

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

AMTLICHE MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN

TU BRAUNSCHWEIG

INGENIEURMODELL
FÜR DAS VERBUNDSYSTEM
STAHLBETON + KLEBELASCHE

TEIL 1

STATISCHE GRUNDVERSUCHE
AN DURCH ANGEKLEBTE STAHLASCHEN
VERSTÄRKTEN STAHLBETONBALKEN

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy
Dipl.-Ing. P. Holzenkämpfer

März 1989

Gefördert von der Stiftung Volkswagenwerk

INGENIEURMODELL FÜR DAS VERBUNDSYSTEM STAHLBETON + KLEBELASCHE

TEIL 1

STATISCHE GRUNDVERSUCHE AN DURCH ANGEKLEBTE STAHLNASCHE VERSTÄRKTEN STAHLBETONBALKEN

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy
Dipl.-Ing. P. Holzenkämpfer

März 1989

33-017 881
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der TU Braunschweig
D-3300 Braunschweig

Forschungsbericht
Gefördert von der Stiftung Volkswagenwerk

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung	1
2. Versuchsprogramm	2
3. Baustoffe	4
3.1 Beton	4
3.2 Betonstahl	4
3.3 Laschenstahl	5
3.4 Klebstoff	5
4. Herstellung der Versuchsbalken	5
5. Rechenwerte	6
5.1 Biegetragfähigkeit	6
5.2 Klebverbund	7
5.3 Querkrafttragfähigkeit	9
6. Versuchseinrichtung und Belastung	12
7. Messungen	14
7.1 Balkendurchbiegung	14
7.2 Endverankerungsschlupf der Innenbewehrung	14
7.3 Rißbreiten	14
7.4 Betondehnung	14
7.5 Mittlere Dehnung der Innenbewehrung	14
7.6 Dehnung der Innenbewehrung im Riß	15
7.7 Laschendehnung	15
7.8 Mittlere Bügeldehnung	16
7.9 Balkenhöhe	16
7.10 Horizontale und vertikale Relativverschiebung zwischen Lasche und Innenbewehrung	16

	Seite
8. Ergebnisse	17
8.1 Allgemeines	17
8.2 Bruchverhalten der Balken	18
8.3 Ergebnisse der Messungen	23
9. Zusammenfassung und Ausblick	24
10. Literatur	26

BEZEICHNUNGEN

Kleine Buchstaben

a	: Abstand vom Auflager zum Lasteintragungspunkt
a _l	: Abstand vom Laschenende zum Lasteintragungspunkt
b	: Balkenbreite
b _l	: Laschenbreite
c	: Betondeckung der Bewehrung
d	: Balkendicke
f	: Durchbiegung
h _s	: Statische Nutzhöhe der Bewehrung
h _l	: Statische Nutzhöhe der Lasche
l	: Balkenlänge
l _v	: Verankerungslänge der Laschen, beginnend am Punkt A nach DIN 1045
t _l	: Laschendicke
t _k	: Klebschichtdicke
v	: Versatzmaß nach DIN 1045
w	: Rißbreite
x	: Abstand der Nulllinie vom Druckrand
z _s	: Innerer Hebelarm der Bewehrung
z _l	: Innerer Hebelarm der Lasche

Große Buchstaben

A _s	: Querschnittsfläche der Bewehrungseinlagen
A _l	: Querschnittsfläche der Lasche
E _s	: Elastizitätsmodul der Bewehrung
E _l	: Elastizitätsmodul der Lasche
F	: Pressenkraft
F ⁰	: Oberlast der Schwellbelastung
F ^u	: Unterlast der Schwellbelastung
LF	: Lastfall
LS	: Laststufe
M	: Biegemoment
Q	: Querkraft
R _{p0,2}	: 0,2 %-Dehngrenze des Bewehrungsstahls

R_e : Elastizitätsgrenze des Laschenstahls
 R_m : Zugfestigkeit des Laschenstahls

Griechische Buchstaben

β_R : Rechenwert der Betondruckfestigkeit
 β_{S1} : Streckgrenze des Laschenstahls
 β_{SS} : Streckgrenze des Bewehrungsstahls
 β_{W28} : Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen
 β_{WVD} : Würfeldruckfestigkeit zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung
 β_{SZ} : Spaltzugfestigkeit zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung
 ϵ_{bm} : Mittl. Betondehnung, gemessen über eine Strecke von 100 mm
 ϵ_{sm} : Mittl. Betonstahldehnung, gemessen über eine Strecke von 100 mm
 ϵ_{sR} : Dehnung der Bewehrung im Riß
 ϵ_l : Dehnung der Lasche, gemessen auf der Laschenunterseite mit DMS
 η : Verstärkungsgrad = $M_{uV2^0/00}/M_{u05^0/00}$
 μ_s : Geometrischer Bewehrungsgrad (Bewehrung) = $100 \cdot A_s/b \cdot d$
 μ_l : Geometrischer Bewehrungsgrad (Lasche) = $100 \cdot A_l/b \cdot d$
 $tot \mu$: Geometrischer Gesamtbewehrungsgrad = $\mu_s + \mu_l \cdot R_{el}/R_{p0,2s}$
 $tot \omega$: Mechanischer Gesamtbewehrungsgrad = $0.01 \cdot tot \mu \cdot R_{p0,2s}/\beta_{WVD} \cdot 0,7$
 τ_0 : Grundwert der Schubspannung nach DIN 1045

Indizes

O : Unverstärkter Zustand
V : Verstärkter Zustand
u : Bruchzustand
2^{0/00} : Bei 2 ^{0/00} Stahldehnung
5^{0/00} : Bei 5 ^{0/00} Stahldehnung
Norm : Errechnet mit Nennwerten nach DIN 1045
Ist : Errechnet mit ermittelten Festigkeitswerten
Vers. : Gemessen im Versuch

1. EINLEITUNG

Im Rahmen der Nutzungsänderung eines Bauwerkes oder auch bedingt durch Fehler in der Bauwerksbemessung und -ausführung, wird es häufig notwendig, bestehende Stahlbeton- und Spannbetonbauwerke zu verstärken.

Eine wirtschaftliche Methode zur Verstärkung von Balken und Platten stellt das Ankleben von Baustahllaschen in der Zugzone eines Biegetraggliedes dar. Hierdurch entsteht das Verbundsystem Stahlbeton + Klebe- lasche, das erst durch die Entwicklung hochfester Epoxidharzklebstoffe möglich wurde. Schon seit den sechziger Jahren wurden in Frankreich [1] bis [4] und später in Japan [5], [6], in der Schweiz [7] bis [9] und in Großbritannien [10] bis [13] Versuche mit angeklebter Bewehrung abgewickelt. Seit 1978 wurden am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz einige Forschungsarbeiten [14] bis [17] zu diesem Themenkreis durchgeführt. Hierbei hat man insbesondere die Einflußgrößen der Verbund- festigkeit sowie das Riß- und Verformungsverhalten von laschenverstärkten Stahlbetonzuggliedern studiert und mit Hilfe der Versuchsergebnisse eine Theorie zur Kraftabtragung in Klebungen zwischen Stahl und Beton entwik- kelt sowie die geometrischen und mechanischen Zusammenhänge formelmäßig beschrieben [18]. Die Theorie ist allerdings nicht in der Lage, die Bean- spruchungen im gerissenen Zustand II bei ortsveränderlichem Biegemoment zu beschreiben. Das Biege-/Schubtragverhalten von Platten wurde in drei Arbeiten [19] bis [21] untersucht.

Trotz dieser Vorarbeiten ist es weder in Braunschweig noch an anderer Stelle gelungen, eine geschlossene Theorie des Verhaltens im Zustand II und des Bruches von praxisüblichen Stahlbetonbauteilen zu entwickeln. Dies gilt sowohl für ruhende als auch für dynamische Belastung. Die bisher durchgeführten Verstärkungen erfolgten nach Ansätzen, mit denen das Versagen des Klebverbundes nicht zuverlässig vorhergesagt werden kann.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, für das Tragverhalten des Ver- bundsystems ein mechanisch begründetes Modell über den gesamten Beanspru- chungsbereich bis hin zum Versagen aufzustellen. Weil auch dynamisch be- anspruchte Bauwerke ggfs. verstärkt werden müssen, muß das Modell für ru-

hende und dynamische Lasten gelten. Das Ergebnis der Arbeit soll ein Ingenieurmodell für die Bemessung des Verbundsystems sein.

Im Rahmen des laufenden Forschungsvorhabens waren dabei folgende Versuche vorgesehen:

- statische Grundversuche an Balken und Platten,
- dynamische Grundversuche an Stahlbetonrechteckbalken,
- "Bauteilversuche" an laschenverstärkten Stahlbetonbalken mit praxisgerechten Abmessungen zur Überprüfung der mit Hilfe der statischen und dynamischen Grundversuche noch zu entwickelnden ingenieurmäßigen Berechnungsmodelle.

Der vorliegende Zwischenbericht behandelt die in den Jahren 1987 und 1988 durchgeführten statischen Grundversuche an laschenverstärkten Stahlbetonbalken. Hierbei wurden die Versuche mit Rechteckbalken statt, wie im Forschungsantrag vorgesehen, mit Plattenbalken durchgeführt.

2. VERSUCHSPROGRAMM DER STATISCHEN GRUNDVERSUCHE

Als laschenverstärkte Versuchskörper wurden Stahlbetonrechteckbalken mit den Abmessungen $l/b/d = 370/20/27$ cm gewählt. Die Stützweite betrug bei allen Balken 3,0 m. Die Balken sollten so bemessen werden, daß sie durch Verbundbruch in Form eines Kohäsionsbruches im Beton direkt über der Klebschicht versagen.

Sämtliche Balken erhielten eine Längsbewehrung aus 2 IV Ø 10 unten und 2 IV Ø 5,5 oben. Als Vorversuche wurden sieben Balken ohne Schubbewehrung mit einer Verstärkung durch eine angeklebte Stahllasche ausgeführt (DB-Versuchsreihe). Die Abmessungen und Bewehrungsanordnung sind beispielhaft für den Balken DB 04 im Bewehrungsplan in Bild 2.1 dargestellt.

Zum Vergleich wurde der Versuchsbalken DB 01 konzipiert, bei dem statt der angeklebten Stahllasche Bewehrungsstäbe 2 Ø 12 aus Betonstahl BSt 500 S angeordnet wurden. Die gewählte Bewehrungsanordnung ist Bild 2.2 zu entnehmen. Sechs Balken wurden mit Schubbewehrung (SB-Versuchsreihe), be-

stehend aus senkrechten Bügeln $\emptyset 10$ IV, $s_{Bü} = 8,1$ cm zwischen den Lasteinleitungspunkten und Bügeln $\emptyset 6$ IV, $s_{Bü} = 10$ cm in den übrigen Bereichen hergestellt. Bild 2.3 zeigt beispielhaft den Bewehrungsplan des Balkens SB 01.

Bei allen Balken werden Trennbleche als Sollrißstellen an den Laschenenden sowie 20 cm von den Lasteintragungspunkten entfernt angeordnet.

Die Belastung wurde durch eine hydraulische Presse über einen Lastverteilungsträger an zwei Punkten aufgebracht. Der Abstand zwischen den Lasteintragungspunkten betrug im allg. 50 cm. Bei den Balken SB 05 und SB 06 wurde der Abstand zu 110 cm gewählt. Hieraus ergab sich ein Momenten-Schub-Verhältnis von $M/Q \cdot h_s = 5,2$ bzw. 4,0 für die Balken SB 05 und SB 06.

Es wurden folgende Versuchsparameter variiert:

- Verstärkungsgrad η durch Veränderung des Laschenquerschnitts

Der Verstärkungsgrad wird definiert zu $\eta = \frac{M_{uV2^{0/00}}}{M_{u05^{0/00}}}$

$M_{u05^{0/00}}$: rechnerisches Biegebruchmoment im unverstärkten Zustand für 5 $^{0/00}$ -Betonstahldehnung

$M_{uV2^{0/00}}$: rechnerisches Biegebruchmoment im verstärkten Zustand für 2 $^{0/00}$ -Laschendehnung

- Laschendicke t_l
- Laschenbreite b_l
- Laschenlänge a_l
- Momenten-Schubverhältnis $M/Q \cdot h_s = a/h_s$

Die gewählten Versuchsparameter sind in Tab. 2.1 zusammengefaßt. Die Lasteintragung sowie die gewählte Laschenanordnung ist in Übersichten in den Bildern 2.4 bis 2.7 dargestellt.

3. BAUSTOFFE

3.1 Beton

Für die Versuchskörper wurde ein Beton der Festigkeitsklasse B 35 nach DIN 1045 angestrebt. Der Beton war so zusammengesetzt, daß die Zunahme der Druckfestigkeit nach 28 Tagen nur noch gering war. Hierdurch konnten trotz unterschiedlichen Betonalters zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung annähernd gleiche Druckfestigkeitswerte erreicht werden.

Zu jedem Versuchskörper wurden zwölf Begleitkörper hergestellt. Dabei handelte es sich um 6 Würfel mit 150 mm Kantenlänge sowie 6 Zylinder mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe.

Die Begleitkörper wurden nach DIN 1048 geprüft. An den Würfeln wurden die Betondruckfestigkeitswerte nach 28 Tagen sowie zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung bestimmt. An den Zylindern wurden die Werte für die Spaltzugfestigkeit und den statischen Druck-Elastizitätsmodul bei Versuchsdurchführung bestimmt.

Die Zusammensetzung und Eigenschaften des Frischbetons sowie die Ergebnisse der Begleitkörperprüfung sind in Tabelle 3.1 und 3.2 wiedergegeben.

3.2 Betonstahl

Alle Versuchskörper erhielten eine obere Montagebewehrung aus 2 Ø 5,5 mm der Stahlgüte BSt 500 M sowie als untere Bewehrung 2 Ø 10 aus BSt 500 S. Die unteren Stäbe wurden an den Enden zur Durchführung der Schlupfmessung auf jeder Seite 50 mm aus dem Versuchsbalken herausgeführt. Der Versuchskörper DB 01 wurde zwischen den Auflagern zusätzlich mit 2 Ø 12 aus BSt 500 S bewehrt. Die Versuchsbalken der SB-Reihe erhielten eine Bügelbewehrung Ø 6 aus BSt 500 S. Die Lage der Bewehrung ist den Bewehrungszeichnungen Bild 2.1 bis 2.3 zu entnehmen.

Für die verwendeten Stähle wurden die Werte für Ist-Ø, Ist-Querschnitt, 0,2 %-Dehngrenze, Zugfestigkeit und Zug-Elastizitätsmodul bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.3 zusammengestellt.

3.3 Laschenstahl

Für die Laschen kamen gewalzte Flachstahlprofile der Stahlgüte St 37-2 in verschiedenen Abmessungen zur Anwendung. Die Werte für Laschenbreite, Laschendicke, Laschenquerschnitt, Streckgrenze, Zugfestigkeit und Zug-Elastizitätsmodul wurden ermittelt und sind in Tabelle 3.4 wiedergegeben.

3.4 Klebstoff

Als Klebstoff wurde XB 3074 auf Basis von ARALDIT-Epoxidharz der CIBA-GEIGY AG verwendet, der uns in dankenswerter Weise vom Hersteller kostenlos zur Verfügung gestellt wurde.

Einige Angaben zur Verarbeitung sowie die Mindestwerte für die mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 3.5 zusammengestellt. Von dem verwendeten Klebstoff wurden zwei Prismen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ für die Biegezugprüfung hergestellt. Aus den geprüften Prismen wurden zwei mal zwei Würfel $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ für die Druckfestigkeitsprüfung gewonnen. Die Ergebnisse der Prüfungen sind in der Tabelle 3.6 wiedergegeben.

4. HERSTELLUNG DER VERSUCHSBALKEN

Die Balken wurden nacheinander in einer Holzschalung aus 22 mm dicken kunststoffbeschichteten Sperrholzplatten betoniert. Der Beton wurde in einem 500 l Zwangsmischer hergestellt, mit der Schaufel eingebracht und mit Tauchrüttlern verdichtet. Je Balken war eine Mischung notwendig. Die untere Bewehrung 2 Ø 10 wurde unten in die Schalung gelegt und lag damit im Verbundbereich I. Bild 4.1 zeigt einen Teil eines Versuchsbalkens vor dem Einbringen des Betons. Je Betonagetermin wurden 2 Versuchskörper hergestellt.

Die Versuchs- und Begleitkörper wurden 7 Tage unter feuchten Tüchern und dann trocken unter Raumtemperatur gelagert.

Etwa zwei Wochen vor Versuchsbeginn wurden die Klebflächen des Betons mit einem tragbaren Vacuum-Strahlgerät vom Typ Eductomatic mit Stahlkorund Nr. 24 gestrahlt. Vor der Klebung wurden auf der gestrahlten Betonfläche Haftzugversuche durchgeführt und Haftzugfestigkeitswerte vom i.M. $3,1 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Die Stahllaschen wurden ebenfalls gesandstrahlt. Der Reinheitsgrad entsprach SA 3 nach DIN 55928, Teil 4. Ein evtl. von der nicht vollständig ölfreien Preßluft beim Strahlen zurückbleibender Fettfilm wurde mit Trichloräthylen abgewaschen.

Anschließend wurde der Klebstoff XB 3074 der Firma Ciba-Geigy dachförmig auf die Lasche aufgetragen und die Lasche auf die Klebfläche des Versuchskörpers geklebt. Der zum allseitigen Austreten des Klebstoffs erforderliche Anpreßdruck wurde über ein lastverteilendes Kantholz mit Schraubzwingen aufgebracht. Die Klebschichtdicke betrug im Endzustand etwa 0,5 - 1 mm.

5. RECHENWERTE

5.1 Biegetragfähigkeit

Die rechnerischen Biegebruchmomente wurden mit dem von QUASt entwickelten Programm "PBMQ-Programm gesteuertes Berechnen im Massivbau, Querschnittsuntersuchungen" sowohl mit den Nennfestigkeiten nach DIN 1045 als auch mit den tatsächlichen Festigkeitswerten errechnet.

Für die Spannungsdehnungslinie des Betons wurde das Parabel-Rechteck-Diagramm, für den Laschen- und Betonstahl die bilineare Spannungs-Dehnungslinie nach DIN 1045 angesetzt. Dabei galten folgende Annahmen:

$$b = 20 \text{ cm}$$

$$d = 27 \text{ cm}$$

$$h_s = 24 \text{ cm}$$

$$h_l = d + t_k + t_l/2, \quad t_k = 1 \text{ mm}$$

$$\beta_R = 23 \text{ MN/m}^2$$

$$\beta_{ss} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta_{S1} = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$E_S = E_1 = 210000 \text{ N/mm}^2$$

Nach DIN 1045 entspricht das rechnerische Biegebruchmoment dem Moment, bei dem entweder die Stahldehnung ε_s (im unverstärkten Zustand) bzw. in Analogie dazu die Laschendehnung ε_l (im verstärkten Zustand) 5 ‰ und/oder die Betondehnung ε_b in der Druckzone -3,5 ‰ erreicht.

In den Zulassungen für Laschenverstärkungen [22] ist das rechnerische Biegebruchmoment für eine maximale Laschendehnung von $\varepsilon_l = 2$ ‰ zu errechnen. Das rechnerische Gebrauchsmoment zu M ergibt sich nach Zulassung aus dem rechnerischen Biegebruchmoment, dividiert durch 1,75. In Tabelle 5.2 sind die nach DIN 1045 und Zulassung [22] errechneten Schnitt- und Belastungsgrößen dargestellt. Mit den rechnerischen Biegebruchmomenten M_{uV2} ‰ wurden die M/z -Linien und die um das Versatzmaß v versetzte Zugkraftlinie bestimmt und dann nach der Zulassung [22] die Laschenlänge festgelegt.

Die Tabelle 5.3 zeigt die mit Hilfe des Programms "PBMQ" mit tatsächlichen Material- und Querschnittswerten errechneten rechnerischen Biegebruchmomente im verstärkten Zustand für 2 ‰ und 5 ‰ Laschendehnung sowie die daraus resultierenden Pressenkräfte. Hierbei wurde als Rechenfestigkeit des Betons die Prismendruckfestigkeit als Kurzzeitfestigkeit $\beta_R = \beta_p = 0,85 \cdot \beta_W$ angenommen. Für β_W wurde der Mittelwert der Würfelprüfung am Versuchstag gesetzt.

5.2 Klebverbund

RANISCH hat in [18] für laschenverstärkte Stahlbetonzugglieder eine Rechenmethode zur Abschätzung der Laschenzugkräfte, die zu einem Verbundbruch in der Klebfuge führen, hergeleitet. Dem Rechenverfahren liegt ein aus Versuchsbeobachtungen abgeleitetes bilineares Kraft-Verschiebungsdiagramm des Klebstoffs zugrunde, wobei das Verhalten der Klebschicht als ideal-elastisch und das des darüberliegenden Betons als plastisch-entfestigend angenommen wird.

Zur Berechnung der erforderlichen Verankerungslänge der Laschen von Biegetraggliedern wurde das o.g. Rechenverfahren in vereinfachter Form in die Zulassung [22] übernommen. Hiernach läßt sich die erforderliche Verankerungslänge für den rechnerischen Bruchzustand wie folgt angeben:

$$\text{erf } l_v = \frac{Z_{1u}^2}{b_l \cdot t_l \cdot k \cdot \tau_k}$$

τ_k : Rechenwert der Klebverbundspannung, abhängig von der Haftzugfestigkeit des Betons auf der Klebfläche. Für eine mittlere Haftzugfestigkeit von $\beta_{\perp m} = 3,1 \text{ N/mm}^2$ gibt die Zulassung $\tau_k = 12 \text{ N/mm}^2$ an

k: Beiwert $k = 30 \text{ N/mm}^2$

Durch Umstellung obiger Gleichung läßt sich für eine vorhandene Verankerungslänge l_v die rechnerische Laschenzugkraft Z_{1u} , bei der ein Verbundbruch auftritt, errechnen.

In Tabelle 5.4 sind die für die geprüften Versuchsbalken errechneten Laschenzugkräfte Z_{1u} und die daraus resultierenden Verbundbruchmomente M_{uv} sowie die dazugehörigen Pressenkräfte F_{uv} zusammengestellt. Hierbei wurde mit tatsächlichen Material- und Querschnittsgrößen gerechnet. Weiterhin galten folgende Annahmen:

$$\tau_k = 12 \text{ N/mm}^2$$

$$h_s = 23,9 \text{ cm}$$

Versatzmaß: DB-Balken $v = 26 \text{ cm}$
SB-Balken $v = 20 \text{ cm}$

5.3 Querkrafttragfähigkeit

5.3.1 Querkrafttragfähigkeit nach DIN 1045

DB-Versuchsbalken:

Die nicht schubbewehrten Balken werden wie Platten behandelt. Nach DIN 1045 darf bei Platten mit gestaffelter Längsbewehrung auf eine Schubbewehrung verzichtet werden, wenn

$$\tau_0 < k_1 \cdot \tau_{011}(\text{Zeile 1a}) \quad \text{mit } k_1 = \frac{0,2}{d} + 0,33 \begin{matrix} \geq 0,5 \\ \leq 1 \end{matrix}$$

$$k_1 = \frac{0,2}{0,27} + 0,33 = 1,07 > 1,0 \text{ (maßgebend)}$$

Für einen Beton der Güte B 35 ergibt sich:

$$\tau_0 < 0,4 \text{ MN/m}^2$$

Bei Ausnutzung der 2,1-fachen zulässigen Schubspannungen ergibt sich eine Schubbruchquerkraft von:

$$Q_u = \tau_u \cdot b \cdot 0,85 \cdot h_s = 0,4 \cdot 2,1 \cdot 0,2 \cdot 0,85 \cdot 0,24 \cdot 10^3 = 34,3 \text{ kN}$$

SB-Versuchsbalken:

Bei einer weischnittigen Biegelbewehrung von $\emptyset 6$, $s_{Bü} = 10 \text{ cm}$ mit $a_s \text{ Bgl.} = 5,65 \text{ cm}^2/\text{m}$ ergibt sich eine durch die Biegel aufnehmbare Schubspannung von

$$\tau = 0,0565 \cdot \frac{500}{20 \cdot 1,75} = 0,807 \text{ MN/m}^2$$

$$\text{Da } \tau = 0,807 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} > 0,4 \tau_{012} = 0,4 \cdot 1,00 = 0,4 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \rightarrow \text{Schubbereich 2}$$

Damit ergibt sich :

$$\tau_0 = \sqrt{\tau \cdot \tau_{02}} = \sqrt{0,807 \cdot 2,4} = 1,39 \text{ MN/m}^2$$

Die rechnerische Bruchschubspannung läßt sich dann bei Ausnutzung der 1,75-fach zulässigen Schubspannung zu $\tau_u = 1,75 \cdot 1,39 = 2,44 \text{ MN/m}^2$ abschätzen.

Damit ergibt sich eine rechnerische Schubbruchquerkraft von $Q_u = 2,44 \cdot 0,2 \cdot 0,85 \cdot 0,24 \cdot 10^3 = 99,6 \text{ KN}$. In Tabelle 5.5 sind die so ermittelten Bruchschubspannungen und Schubbruchquerkräfte sowie die zugehörigen Pressenkräfte zusammengestellt.

5.3.2 Abschätzung der Querkrafttragfähigkeit nach RAFLA et al

RAFLA et al [23] haben für schubbewehrte und nichtschubbewehrte durch M und Q beanspruchte Stahlbetonbiegetragglieder mit durchgehender Längsbewehrung Beziehungen für die Bruchschubspannungen angegeben. Zur Abschätzung der Querkrafttragfähigkeit der Versuchsbalken bleiben die Laschen unberücksichtigt, da sie vor dem Auflager enden und damit in Bereichen maximaler Querkraft fehlen, so daß sie nicht zu einer Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit beitragen.

Die Formeln lauten:

nicht schubbewehrte Tragglieder:

$$\tau_{u0} = f(\lambda_s) \cdot \frac{\beta_W^{1/2} \cdot \mu^{1/3}}{(h/10)^{1/4}} \quad [\text{kp/cm}^2]$$

β_W : mittlere Würfeldruckfestigkeit in kp/cm^2

μ : Längsbewehrungsgrad $\mu = A_s/b \cdot h$

h : statische Nutzhöhe in cm

$f(\lambda_s)$: ein von $\lambda_s = a/h$ abhängiger Faktor

für $\lambda_s \geq 3,5$: $f(\lambda_s) = 0,90 - 0,03 \cdot \lambda_s$

schubbewehrte Tragglieder:

$$\tau_u = \tau_{u0} + \tau_{u1} \quad \text{für } \tau_{u1} < \tau_{u0}$$

$$\tau_u = \tau_{u0} \left(1 + \left(\frac{\tau_{u1}}{\tau_{u0}} \right)^{1/3} \right) \quad \text{für } \tau_{u1} > \tau_{u0}$$

$$\max \tau_u \leq 0,22 \beta_W \quad \text{für } \beta = 90^\circ$$

β : Neigungswinkel der Schubbewehrung

$$\tau_{u1} = \mu_{sBü} \cdot \beta_s \cdot (0,18 h)^{1/4} \cdot f(\lambda_s) \cdot f(s/h) \cdot f(v) \quad [\text{kp/cm}^2]$$

$$\mu_{sBü}: \text{Schubbewehrungsgrad: } \mu_{sBü} = \frac{A_{sBü}}{b \cdot s \cdot \sin \beta}$$

β_s : Streckgrenze der Schubbewehrung in kp/cm^2

$f(\lambda_s)$: für $\lambda_s \geq 3,0$: $f(\lambda_s) = 1,0$

s : Abstand der Schubbewehrungselemente

$f(s/h)$: ein von s/h und β abhängiger Faktor
für $\beta 90^\circ$ und $s/h \leq 1,0$: $f(s/h) = 1,0$

$f(v)$: Faktor zur Berücksichtigung der Verankerung der Bügel;
nicht verschweißte Bügel: $f(v) = 1,0$

Mit $Q_u = \tau_u \cdot 7/8 \cdot b \cdot h$ kann die zum Schubbruch führende Querkraft Q_u und die dazugehörige Pressenkraft ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.6 zusammenfassend dargestellt.

Dabei wurde mit folgenden Material- und Querschnittswerten gerechnet:

$$h = h_s = 24 \text{ cm}$$

$$\beta_s = 5000 \text{ kp/cm}^2$$

$A_{sBü}$: Nennquerschnitt eines Bügels

$$\beta = 90^\circ \text{ (senkrechte Bügel)}$$

A_s : tatsächlicher Querschnitt der Längsbewehrung

6. VERSUCHSEINRICHTUNG UND BELASTUNG

Das Bild 6.1 zeigt schematisiert eine Übersicht über den gewählten Versuchsaufbau bei der Prüfung des gesamten Balkens (LF 1).

Auf den Längsträgern eines Prüfrahmens, der mit einem Mörtelbett auf der Kellerbodenplatte der Prüfhalle ruht, wurden zur Auflagerung der Versuchsbalken Stahlbetonauflagerblöcke angeordnet. Zur punktförmigen Auflagerung der Versuchskörper wurde am linken Auflager ein Stahlrollenlager und am rechten Auflager ein Stahlhalbrollenlager verwendet, deren vollflächige Bettung mit Hilfe eines dünnen Gipsbettes erreicht wurde. Durchbiegungsmessungen an den Auflagern ergaben keine meßbaren Vertikalbewegungen unter Last.

Die Belastung erfolgte bei den Versuchsbalken der DB-Reihe durch eine hydraulische 140 kN-Pressen und bei den Balken der SB-Reihe durch eine 500 kN-Pressen. Die Presse stützte sich bei Lastaufbringung gegen die 1 m dicke kreuzweise vorgespannte Betondecke ab. Voruntersuchungen hatten ergeben, daß die Durchbiegung der Decke unter den zu erwartenden Pressenkräften vernachlässigbar klein war.

Die Last wurde über zwei ausgesteifte Lasteinleitungsträger mit einem darüberliegenden Lastverteilungsträger an zwei Punkten des Balkens eingeleitet.

Die Versuchsanordnung und die Belastungseinrichtung zeigen die Bilder 6.2 und 6.3.

Die Belastung erfolgte kraftgeregelt in Laststufen bis zur Oberlast. Als Oberlast wurde etwa die mit den tatsächlichen Baustofffestigkeiten errechnete Gebrauchslast des verstärkten Balkens gewählt. Die Gebrauchslast ergibt sich aus der rechnerischen Bruchlast bei 2 ‰ Laschendehnung, dividiert durch den Sicherheitsbeiwert 1,75. Wenn mit einem frühzeitigen Verbundbruch zu rechnen war, wurde bei einigen Balken eine geringere Oberlast als die Gebrauchslast gewählt.

Nach dem Erreichen der 1. Oberlast schloß sich eine Schwellbelastung mit 10 Lastwechseln an, um eine deutlich ausgeprägte Rißbildung zu erzielen.

Als Unterlast wurde ca. $1/10$ der mit tatsächlichen Baustofffestigkeiten errechneten Bruchlast bei 2 ‰ Laschendehnung gewählt. Nach Abschluß der Messungen bei der letzten Unterlaststufe wurde auf pressenwegeregelter Belastung umgestellt und in Laststufen so lange belastet, bis Versagen des Balkens eintrat. In den Laststufenplänen Bild 6.5 - 6.18 ist der Ablauf der Belastung graphisch dargestellt. Die Auftragung auf der Zeitachse erfolgte dabei unmaßstäblich. In den nebenstehenden Tabellen sind die Laststufennummern mit den dazugehörigen Pressenkräften F in kN angegeben. In der Darstellung wird zwischen Laststufen mit "automatischer" und "kompletter" Messung unterschieden. Bei den Laststufen mit "automatischer" Messung wurde auf die manuell durchgeführten Messungen, wie Ablesung des Verankerungsschlupfs an den Enden der Bewehrungsstäbe und der Rißbreiten sowie Messung der Betondehnungen mit SDM verzichtet.

Da die Laschenverbundlänge auf der linken Balkenseite kürzer als auf der rechten gewählt wurde, trat das Versagen stets im Bereich der linken Balkenhälfte oder in Feldmitte ein, so daß die rechte Balkenseite in einem zweiten Lastfall geprüft werden konnte. Hierzu wurde das linke Auflager unter dem linken Lasteintragungspunkt des 1. Lastfalls angeordnet und die hydraulische Presse an der Decke so verfahren, daß die Pressenkraft am rechten Lasteintragungspunkt über einen Lasteinleitungsträger direkt aufgebracht werden konnte. Die Versuchseinrichtung im Lastfall 2 ist schematisiert in Bild 6.4 dargestellt. Versagte der Balken im Lastfall 1 durch Verbundbruch, so wurde der Verbund zwischen Lasche und Beton durch aufgebrachten Querdruck mittels links von der Pressenkraft angebrachter Schraubzwingen soweit wie möglich verbessert. Es kam jedoch bei mehreren Versuchsbalken trotz der angebrachten Schraubzwingen unter Belastung zum Durchrutschen der linken Laschenseite. Die Belastung erfolgte weggeregelt in Laststufen bis zum Versagen des Balkens.

7. MESSUNGEN

7.1 Messung der Balkendurchbiegung

Balkendurchbiegungen wurden mit induktiven Wegaufnehmern W 50 jeweils in den Viertelpunkten und in Balkenmitte sowie zur Kontrolle an den Balkenauflagern gemessen (s. Bild 7.1 - 7.4).

7.2 Messung des Endverankerungsschlupfs der Innenbewehrung

Der Endverankerungsschlupf der unteren Längsbewehrung wurde mit Hilfe von gegen die Stirnseite des Balkens angebrachten Meßuhren gemessen. Die Messungen ergaben, daß kein Schlupf an den Stabenden während der Versuchsdurchführung auftrat. Die Meßeinrichtung ist in Bild 7.5 gezeigt.

7.3 Messung der Rißbreite

Bei allen Laststufen mit kompletter Messung wurden die Rißentwicklung aufgezeichnet und die Rißbreiten in Höhe der Rißlinien 1 - 3 (vgl. Bild 7.1 - 7.3) gemessen. Die Risse wurden mit einer Fernsehkamera mit Makroobjektiv aufgenommen und mit rd. sechzigfacher Vergrößerung auf einem Monitor wiedergegeben und dort mit einem Vergleichsmaßstab gemessen.

7.4 Messung der Betondehnung

Es wurden Betondehnungen auf der hinteren Balkenlängsseite 40 mm unterhalb des Druckrandes über die gesamte Balkenstützweite sowie in Höhe der unteren Innenbewehrung zwischen den Lasteintragungspunkten mit einem Setzdehnungsmesser mit 100 mm Meßbasis gemessen. Die Lage der Meßstellen ist den Bildern 7.1 - 7.3 zu entnehmen.

7.5 Messung der mittleren Dehnung der Innenbewehrung

Zur Messung der Betonstahldehnung wurden auf den Bewehrungsstäben im Abstand von 100 mm Stahlsockel mit einem Innengewinde \emptyset 5 mm angebracht und

mit Moosgummi abgedeckt (s. Bild 7.6). Nach dem Ausschalen wurde das Moosgummi entfernt und Schrauben M 5 eingedreht, an denen Aluminiumblöcke als Halter für die Wegaufnehmer befestigt waren. Anschließend wurden Wegaufnehmer W 1 und W 2 mit Tauchanker eingesetzt, so daß eine Meßkette zur Messung der mittleren Stahldehnungen über eine Strecke von jeweils 100 mm gebildet wurde. Die Meßketten erstreckten sich jeweils vom Balkenaufleger bis 50 mm vor die Lasteintragungspunkte (vgl. Bild 7.1 - 7.3). Die Meßeinrichtung wird in den Bildern 7.7 und 7.8 gezeigt.

7.6 Messung der Dehnung der Innenbewehrung im Riß

An den Laschenenden sowie in einer Entfernung von 20 cm von den Lasteintragungsstellen in Richtung der Auflager wurden Sollrißstellen durch Einlegen von Trennblechen in die Zugzone des Betons angeordnet. An diesen Stellen wurden 3 mm lange Dehnmeßstreifen auf die untere Innenbewehrung geklebt. Im Versuch wurden die Betonstahldehnungen im Riß gemessen. Die Lage der DMS ist den Bewehrungsplänen (Bild 2.1 - 2.3) sowie den Meßstellenplänen (Bild 7.1 - 7.3) zu entnehmen.

7.7 Messung der Laschendehnung

Zur Messung der Laschendehnungen wurden auf die Unterseite der Flachstahllaschen 30 mm und 90 mm lange DMS geklebt. Um den Verlauf der Laschenzugkraft möglichst genau zu erfassen, wurden insbesondere an den Laschenenden und in der Nähe der Lasteintragungsstellen die DMS in einem engeren Abstand angeordnet. Die genaue Lage der DMS auf der Lasche ist in den Meßstellenplänen (Bild 7.2 und 7.3) beispielhaft dargestellt. Es wurden relativ lange DMS gewählt, um den Einfluß örtlicher Verbundspannungsspitzen im Bereich der Risse auf die Ermittlung der Laschenzugkräfte aus den gemessenen Laschendehnungen stark zu reduzieren. Lediglich über den Sollrißstellen in der Nähe der Lasteintragungspunkte wurden 3 mm lange DMS auf die Laschenunterseite geklebt.

7.8 Messung der mittleren Bügeldehnung

Zur Messung der mittleren Bügeldehnungen im Bereich der Laschenenden wurden bei den Balken der SB-Reihe SDM-Meßstellen mit 100 mm Meßbasis auf den vertikalen Bügelschenkeln angeordnet und zwar derart, daß sich der vom Sollrißblech an den Laschenenden ausgehende Schubriß innerhalb der Meßstrecke befand. Die Lage der Meßstellen zeigt beispielhaft der Meßstellenplan in Bild 7.3. In Bild 7.9 sind die SDM-Meßstellen zur Messung der mittleren Bügeldehnungen abgebildet.

7.9 Messung der Balkenhöhe

An den Stellen, an denen bei den Balken der SB-Reihe die Bügeldehnungen gemessen werden, sind mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern Meßstellen zur Messung der Balkenhöhe eingerichtet worden. Die Meßeinrichtung ist im Bild 7.10 erkennbar.

7.10 Messung der horizontalen und vertikalen Relativverschiebung zwischen Lasche und Innenbewehrung

Es wurden horizontale und vertikale relative Verschiebungen von der Laschenunterseite bis zur Höhe der Innenbewehrung mit induktiven Wegaufnehmern an den Laschenenden und an den Sollrißstellen in der Nähe der Lasteintragungspunkte gemessen. Hierzu wurden Stahlwinkel auf die Laschenunterseite geklebt, die so ausgebildet waren, daß vertikal und horizontal angeordnete induktive Wegaufnehmer gegen die Schenkel der Winkel tasteten. Die Wegaufnehmer waren an einem in Höhe der Innenbewehrung auf den Beton geklebten Wegaufnehmerhalter befestigt. Die Meßeinrichtung ist in Bild 7.11 gezeigt. Die Lage der Meßstellen ist beispielhaft den Bildern 7.2 und 7.3 zu entnehmen.

8. ERGEBNISSE

8.1 Allgemeines

Im folgenden Abschnitt wird das Bruchverhalten der einzelnen Platten besprochen. Außerdem werden die Rechenwerte der Bruchlasten den tatsächlich erreichten Bruchlasten gegenübergestellt und ein großer Teil der während der Prüfung der Versuchskörper im Lastfall 1 gemessenen Werte in Diagrammen dargestellt.

Eine abschließende Auswertung der Ergebnisse liegt noch nicht vor. Sie wird im Schlußbericht erfolgen.

In den Tabellen 8.1 und 8.2 werden die in Abschnitt 5 ermittelten Rechenwerte der Bruchlasten und die tatsächlich im Versuch erreichten gegenübergestellt sowie die Versagensart angegeben. Rechnerisch ist, wie angestrebt, in allen Fällen das Versagen des Klebverbundes maßgeblich. Im Versuch wurden die rechnerischen Verbundbruchlasten deutlich überschritten, so daß bei einigen DB-Balken Querkraftversagen maßgebend wurde. Um den Schubbruch hinauszuzögern und doch Verbundbruch zu erreichen, wurden im Bereich der Schubrisse an den Laschenenden zur Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit Schraubzwingen angebracht. Hierbei wurde darauf geachtet, daß die Schraubzwingen nicht die Laschen berührten.

Die Bilder 8.1 und 8.2 zeigen die Riß- und Bruchbilder der Balken nach Abschluß der Versuche.

Bei allen SB-Balken außer bei Balken SB 02 trat Kohäsionsbruch im Beton wenige Millimeter über der Klebschicht ein. Dieses Versagen wird im allg. als Verbundbruch bezeichnet. Bei den meisten SB-Balken hatte sich die Lasche am Laschenende bereits bei einer deutlich geringeren Last als der Bruchlast auf einer Länge von 2 - 10 cm gelöst. Bei Erreichen der Bruchlast trat dann schlagartiger Verbundbruch vom Laschenende bis etwa zum Lasteinleitungspunkt ein. Hierbei ist nicht eindeutig geklärt, ob das Versagen des Verbundes am Laschenende beginnt und in Richtung Balkenmitte oder von einem nahe dem Laschenende befindlichen Biegeschubriß zum Lasch-

enende läuft und sich so an weiteren Rissen in Richtung Balkenmitte entwickelt. Ein entsprechender Versuch ist noch durchzuführen.

8.2 Bruchverhalten der Balken

Balken DB 01

Ab LS 5 ($F = 15 \text{ kN}$) bildete sich auf der linken Seite hinter dem Ende der unteren Bewehrungslage ein Schubriß aus, der sich bis LS 29 ($F = 62,5 \text{ kN}$) ständig erweiterte und dann zum Schubbruch führte. Die Breite des Schubrisses betrug maximal 1,7 mm.

Balken DB 02

Lastfall 1:

Hinter dem linken Laschenende bildete sich ein kräftiger Schubriß, dessen weitere Entwicklung zur Vermeidung eines Schubbruches durch Anbringen von Schraubzwingen stark reduziert wurde. Nach Erreichen von LS 16 ($F = 45 \text{ kN}$) versagte der Balken durch einen Verbundbruch am linken Laschenende auf einer Länge von ~ 22 cm.

Lastfall 2:

Hier kam es ebenfalls zur Bildung eines Schubrisses, dessen weiteres Aufgehen nach LS 10 ($F = 83 \text{ kN}$) durch Querdruck behindert wurde. Nach LS 20 ($F = 117 \text{ kN}$) trat Verbundbruch am rechten Laschenende auf ca. 20 cm Länge ein. Weitere Laststufen mit geringeren Lasten führten zu einem weiteren Lösen der Lasche.

Balken DB 04

Lastfall 1:

Während der Laststufen fiel die Belastungseinrichtung nach Erreichen von LS 12 und LS 20 aus, was eine Entlastung des Balkens zur Folge hatte. Nach Wiederbelastung versagte der Balken am linken Laschenende bei LS 30 ($F = 67,7 \text{ kN}$) durch Schubbruch.

Lastfall 2:

Der Balken versagte am rechten Laschenende nach Erreichen von LS 14 ($F = 129 \text{ kN}$) durch Schubbruch.

Balken DB 06

Es kam zur Bildung eines ausgeprägten Schubrisses am linken Laschenende, der nach LS 28 ($F = 65,2 \text{ kN}$) durch Aufbringen von Querdruck behindert wurde. Nach Fließen von Betonstahl- und Laschenbewehrung sowie großer Durchbiegung versagte der Querschnitt durch Schubbruch auf der linken Seite bei LS 44 ($F = 69,0 \text{ kN}$).

Balken DB 08

Lastfall 1:

Der Balken versagte durch Schubbruch auf der linken Seite kurz vor Erreichen von LS 16 ($F = 57,5 \text{ kN}$).

Lastfall 2:

Zur Behinderung eines weiteren Aufgehens des Schubrisses am rechten Laschenende wurde nach LS 11 ($F = 88 \text{ kN}$) Querdruck durch Schraubzwingen aufgebracht. Der Balken versagte durch schlagartigen Verbundbruch der rechten Laschenseite auf ganzer Länge kurz vor Erreichen von LS 19 ($F = 123 \text{ kN}$).

Balken DB 09

Lastfall 1:

Nach LS 8 ($F = 29 \text{ kN}$) wurde der Schubriß am linken Laschenende durch Aufbringen von Querdruck behindert. Bei LS 9 ($F = 32,5 \text{ kN}$) löste sich die Lasche am linken Laschenende durch Adhäsionsbruch zwischen Lasche und Klebschicht auf einer Länge von ca. 20 cm. Bei weiterer Belastung trat Verbundbruch auf der linken Laschenseite auf einer Länge von ca. 55 cm bei LS 10 ($F = 25 \text{ kN}$) ein.

Lastfall 2:

Nach LS 12 ($F = 84 \text{ kN}$) Aufbringung von Querdruck zur Behinderung des Schubrisses am rechten Laschenende. Nach LS 15 ($F = 97,5 \text{ kN}$) kam es zum Ausfall der Pressenkraft und damit zum Lastabfall auf 0 kN . Nach LS 20 ($F = 107 \text{ kN}$) versagte der Balken durch schlagartigen Verbundbruch auf der rechten Laschenseite auf 85 cm Länge.

Balken DB 10

Anbringung von Schraubzwingen im Bereich des Schubrisses am linken Laschenende nach LS 13 ($F = 40 \text{ kN}$). Nach dem Fließen von Betonstahl- und Laschenbewehrung und großer Durchbiegung versagte der Balken durch Schubbruch am linken Laschenende bei LS 39 ($67,1 \text{ kN}$).

Balken DB 11

Nach LS 17 ($F = 42,5 \text{ kN}$) wurde das weitere Aufgehen der Schubrisse an beiden Laschenenden durch Aufbringung von Querdruck behindert. Beendigung des Versuchs nach LS 37 ($F = 61,3 \text{ kN}$), nachdem Fließen von Betonstahl- und Laschenbewehrung eingetreten war. Die Meßbereiche der Wegaufnehmer und des Setzdehnungsmessers wurden zum großen Teil überschritten.

Balken SB 01

1. Lastfall:

Schlagartiger Verbundbruch der linken Laschenseite nach LS 15 ($F = 75 \text{ kN}$).

2. Lastfall:

Bei LS 11 ($F = 99,5 \text{ kN}$) Verbundbruch links vom Lasteintragungspunkt, da aufgrund des Verbundbruches im 1. LF die Verbundlänge nicht ausreichte.

Balken SB 02

1. Lastfall:

Nach LS 23 ($F = 92 \text{ kN}$) fiel die Belastungseinrichtung aus und damit die Last auf 0 kN ab. Nach Erreichen von LS 25 ($F = 90 \text{ kN}$) trat ein Versagen am linken Laschenende zwischen Lasche und Innenbewehrung auf. Es hatte sich ein Riß vom Laschenende unter ca. 45° bis zur Höhe der Innenbewehrung und dann horizontal in Richtung Balkenmitte in Höhe der Innenbewehrung mit einer Länge von ca. 15 cm gebildet. Im Verlauf von LS 25 trat dann Verbundbruch am linken Laschenende auf einer Länge von ca. 35 cm ein. Die Bilder 8.3 und 8.4 zeigen den Balkenabschnitt nach dem Bruch.

2. Lastfall:

Bei zunehmender Belastung kam es zum Fließen der Bewehrung und zum Lösen des Verbundes im Bereich des Lasteinleitungspunktes. Bei LS 21 ($F = 177 \text{ kN}$) beginnender Betondruckbruch rechts vom Lasteinleitungspunkt.

Balken SB 03

1. Lastfall:

Bei LS 10 ($F = 45 \text{ kN}$) trat Verbundbruch am linken Laschenende auf einer Länge von ca. 10 cm ein. Bei LS 12 ($F = 50 \text{ kN}$) versagte der Balken durch schlagartigen Verbundbruch der linken Laschenseite.

2. Lastfall:

Bei zunehmender Belastung kam es zum Fließen der Bewehrung und zum Lösen des Verbundes im Bereich des Lasteinleitungspunktes. Versagen durch Betondruckbruch rechts vom Lasteinleitungspunkt bei LS 21 ($F = 154 \text{ kN}$).

Balken SB 04

1. Lastfall:

Bei LS 11 ($F = 50 \text{ kN}$) trat Verbundbruch am linken Laschenende auf ca. 10 cm Länge ein. Der Balken versagte durch schlagartigen Verbundbruch der linken Laschenseite bei LS 16 ($F = 75 \text{ kN}$).

2. Lastfall:

Bei zunehmender Belastung kam es zum Fließen der Bewehrung und zum Lösen des Verbundes im Bereich des Lasteinleitungspunktes. Bei LS 23 ($F = 174,5 \text{ kN}$) beginnender Betondruckbruch rechts vom Lasteinleitungspunkt.

Balken SB 05

1. Lastfall:

Bei LS 10 ($F = 40 \text{ kN}$) war ein Riß zwischen Lasche und Beton am linken Laschenende auf ca. 5 cm Länge erkennbar. Bei LS 17 ($F = 57,5 \text{ kN}$) trat ein schlagartiger Verbundbruch der linken Laschenseite ein (s. Bild 8.5).

2. Lastfall:

Bei LS 12 ($F = 64,5 \text{ kN}$) war ein Riß zwischen Lasche und Beton am rechten Laschenende erkennbar. Bei LS 15 ($F = 73,5 \text{ kN}$) versagte der Balken durch schlagartigen Verbundbruch der rechten Laschenseite (s. Bild 8.6).

Balken SB 06

1. Lastfall:

Bei LS 10 ($F = 45 \text{ kN}$) war ein Riß zwischen Lasche und Beton am linken Laschenende auf ca. 10 cm Länge erkennbar. Nach Erreichen der LS 15 ($F = 70 \text{ kN}$) trat bei $F = 66 \text{ kN}$ schlagartiger Verbundbruch der linken Laschenseite ein.

2. Lastfall:

Bei LS 17 ($F = 79,5 \text{ kN}$) war ein Riß zwischen Lasche und Beton am rechten Laschenende auf ca. 2 cm Länge sichtbar. Der Balken versagte bei LS 23 ($F = 103 \text{ kN}$) durch schlagartigen Verbundbruch der rechten Laschenseite.

8.3 Ergebnisse der Messungen

In den Bildern 8.7 - 8.19 sind die Durchbiegungen der Balken in den Viertelpunkten und in Feldmitte in Abhängigkeit von der Pressenkraft F dargestellt. Der horizontale Sprung in den Kurven entsteht durch die Durchbiegungszunahme zwischen der ersten und der letzten Oberlast infolge abnehmender Biegesteifigkeit durch verstärkte Ausprägung der Rißbildung während der Lastwechsel. Die Durchbiegungen bei Unterlast werden nicht dargestellt.

Die Bilder 8.20 - 8.45 zeigen im Bereich der nahe der Lasteintragspunkte gelegenen Sollrißstellen die gemessenen mittleren Betonstahldehnungen, die Betonstahldehnungen im Riß sowie die Laschendehnungen in Abhängigkeit von der Pressenkraft. Die in der Übersichtsskizze der Bilder über der Innenbewehrung angegebenen Ziffer bezeichnet dabei die Meßstelle für den DMS auf der Bewehrung im Riß. Die in Höhe der Innenbewehrung angegebene Zahl bezeichnet die SDM-Meßstelle für die mittlere Stahldehnung auf der Innenbewehrung, und die unter dem Balken stehende Ziffer meint die Meßstelle für den DMS auf der Laschenunterseite unter dem Riß.

In den Bildern 8.46 - 8.68 sind die jeweils an vier Stellen des Balkens zwischen der Lasche und der Betonoberfläche in Höhe der Innenbewehrung gemessenen horizontalen und vertikalen relativen Verschiebungen in Abhängigkeit von der Pressenkraft dargestellt. Verschiebungen in Richtung Balkenmitte bzw. eine Vergrößerung des Abstandes in vertikaler Richtung ergeben dabei positive Werte.

Die Bilder 8.69 - 8.81 zeigen die gemessenen mittleren Betonstahldehnungen und Laschendehnungen bei einer bruchnahen Belastungsstufe mit dem dazugehörigen Rißbild. An den Laschenenden hatten sich breite Schubrisse gebildet. Z.T. wurden an den Laschenenden negative Dehnungen auf der La-

schenunterseite gemessen. In diesen Bereichen konnte bei einigen Balken eine Störung des Klebverbundes visuell festgestellt werden. Die gemessenen Betonstahldehnungen weisen relativ große Sprünge auf. Messungen über gerissene Bereiche ergeben große, Messungen über ungerissene oder kaum gerissene Bereiche kleine Werte.

In den Bildern 8.82 - 8.144 sind die aus den gemessenen Laschendehnungen mit tatsächlichen Material- und Querschnittswerten errechneten Laschenkräfte als Zugkraftlinie sowie die aus den Laschenkräften errechneten Verbundspannungen in der Klebschicht für jeweils mehrere Laststufen dargestellt.

Die Zugkraftlinien steigen im Bereich der Laschenenden auf der längeren rechten Laschenseite weniger steil an als auf der linken. Außerdem ist festzustellen, daß die Zugkraftlinien nicht, wie zu erwarten wäre, im Bereich der Krafteinleitung an den Laschenenden überproportional sondern eher geradlinig ansteigen. Dies ist wohl durch die mittragende Wirkung des Betons auf Zug in ungerissenen Bereichen und möglicherweise durch lokale Biegeeffekte in der Lasche zu erklären.

Die als Treppenlinien dargestellten Verbundspannungen wurden nach folgender Formel errechnet:

$$\tau_k = \frac{\Delta Z_1}{b_1 \cdot \Delta l}$$

9. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wurden insgesamt vierzehn Balken geprüft. Dreizehn Balken wurden durch vor dem Auflager endende angeklebte Stahllaschen aus St 37-2 verstärkt. Die innere Betonstahlbewehrung bestand aus 2 IV Ø 10 in der unteren Lage. Zum Vergleich wurde ein Balken mit einer zweilagigen Betonstahlbewehrung ohne Laschenverstärkung geprüft. Es wurde die Betongüte B 35 angestrebt.

Folgende Parameter wurden variiert:

- Verstärkungsgrad
- Laschengometrie (Laschendicke, -breite)

- Verbundlänge
- Momenten-Schub-Verhältnis

U.a. wurden Pressenkraft, Durchbiegungen, Stahldehnungen und relative Laschenverschiebungen gemessen. Als Versagensursache wurde Verbundbruch angestrebt.

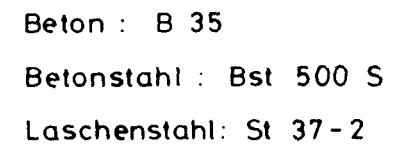
Eine abschließende Auswertung der Ergebnisse liegt noch nicht vor. Im Anschluß an die durchgeführten Versuche wird sich die Theoriebildung für das Verbundsystem Stahlbeton + Klebelasche unter ruhender Belastung anschließen.

Das Ergebnis soll ein Ingenieurmodell für die Bemessung des Verbundsystems sein. Im laufenden Forschungsvorhaben sollen die gefundenen ingenieurmäßigen Berechnungsmodelle an Balken mit praxisgerechten Abmessungen überprüft werden.

10. LITERATUR

- [1] Cirodde, Roger: Techniques d'Assemblage par collage. In: Bull. RILEM Nr. 37, 1967, S. 253 - 261
- [2] L'Hermite, Robert: L'application des colles et des Resines dans la Construction. In: Ann. ITBTP Nr. 239, 1967, S. 1482 - 1497
- [3] Bresson, Jacques: Nouvelles recherches et application concernant l'utilisation des collage dans les structures. In: Ann. ITBTP, Nr. 278, 1971, S. 22 - 55
- [4] Bresson, Jacques: L'application du Beton plaque. In: Ann. ITBTP Nr. 297, 1972, S. 1 - 25
- [5] Bauminister von Tokyo: Betonbalken mit angeklebter Bewehrung unter Biege- und Schubbeanspruchung (japanisch). Herausgegeben vom Bauministerium in Tokyo, April 1971. Bericht Nr. 681
- [6] Sho-Bond Kagaku Co. Ltd.: Entwicklung von Verstärkungsmethoden für Betonplatten (japanisch). Sho-Bond Kagaku Co. Ltd., 4-25-21, AOKI Kawaguchi-City, Japan
- [7] Ladner, Marc; Flueler, Peter: Versuche an Stahlbetonbauteilen mit geklebter Armierung. In: Schweiz. Bauzeitung 92, 1974, S. 463 - 470
- [8] Hugenschmidt, Felix: Epoxy adhesives for concrete and steel. In: International Congress on Polymer Concretes, London, Mai 1975
- [9] Ladner, Marc; Weder, Christian: Geklebte Bewehrung im Stahlbetonbau. Dübendorf: EMPA, 1981, Bericht Nr. 206
- [10] Irvin, C.A.K.: The strengthening of concrete beams by bonded steel plates. Transp. Road. Res. Lab. - Crowthorne/Berkshire: TRRL 1975, Sup. Rep. 160 UC
- [11] MacDonald, M.D.: The flexural behaviour of concrete beams with bonded external reinforcement. TRRL Crowthorne/Berkshire: TRRL 19/8, Sup. Rep. 415
- [12] Jones, R.; Swamy, R.N.; Ang, T.H.: Under and over reinforced concrete Beams with glued steel plates. In: Int. Journ. CEM. Comp. Light Concr. 4 (1982), S. 19 - 32
- [13] MacDonald, M.D.: The flexural performance of 3,5 m concrete beams with various bonded external reinforcements. TRRL Crowthorne/Berkshire: TRRL 1982, Sup. Rep. 728

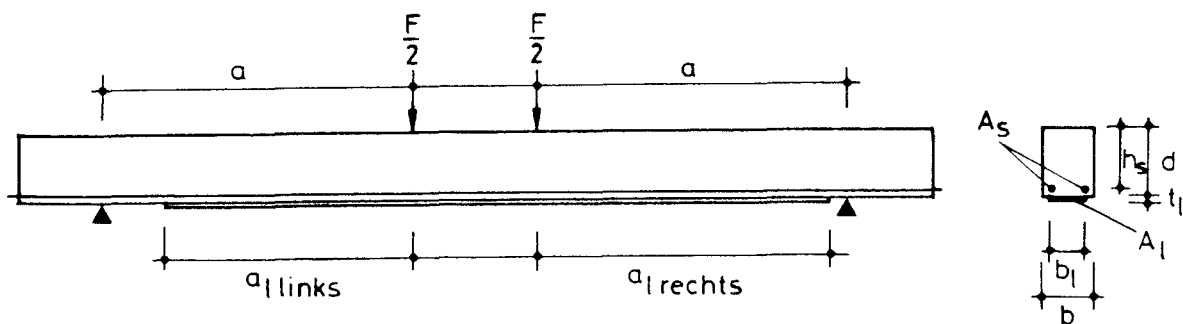
- [14] Rostásy, Ferdinand S.; Ranisch, Ernst-H.; Alda, Willi: Verstärkung von Spannbetonbrücken im Koppelfugenbereich durch angeklebte Stahllaschen. In: Bauingenieur 56 (1981), S. 139 - 145
- [15] Rostásy, Ferdinand S.; Ranisch, Ernst-H.; Alda, Willi: Nachträgliche Verstärkung von Spannbetonbrücken im Koppelfugenbereich durch angeklebte Stahllaschen. In: Forschung - Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 326, Bonn: BMV 1982
- [16] Rostásy, Ferdinand S.; Ranisch, Ernst-H.: Strengthening of bridges with epoxy bonded steel plates. IABSE-Symposium, Washington 1982, Final Report, Vol. 39
- [17] Rostásy, Ferdinand S.; Ranisch, Ernst-H.: Einseitige Verstärkung gerissener Koppelfugenbereiche durch angeklebte Stahllaschen. In: Forschung - Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 378, Bonn: BMV 1983
- [18] Ranisch, Ernst-H.: Zur Tragfähigkeit von Verklebungen zwischen Betonstahl und Beton - Geklebte Bewehrung -. Diss. TU Braunschweig 1982
- [19] Rostásy, Ferdinand S.; Ranisch, Ernst-H.: Nachträgliche Verstärkung von Stahlbetonplatten durch Ankleben von Bewehrung. TU Braunschweig, Inst. f. Baustoffe, Massivbau und Brandschutz / Land Niedersachsen - Braunschweig: Forschungsbericht 1983
- [20] Rostásy, Ferdinand S.; Ranisch, Ernst-H.: Verstärkung von Stahlbetonplatten durch angeklebte Laschen aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Forschungsbericht, Inst. f. Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Juli 1986
- [21] Rostásy, Ferdinand S.; Ranisch, Ernst-H.: Bemessungshilfen für Stahlbetonplatten mit angeklebter Laschenverstärkung. Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig 1986
- [22] Laumer, R.: Schubfeste Klebeverbindung zwischen Stahlplatten und Stahlbetonbauteilen oder Spannbetonbauteilen. Zulassungsbescheid Z-36.1-4, Institut für Bautechnik, Berlin
- [23] Kordina, K.; Iványi, G.; Rafla, K.; Blume, F.: Systematische Auswertung von Schubversuchen an Stahlbetonbalken. TU Braunschweig, Inst. f. Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Forschungsbericht, Juli 1977



23/07/2015

Tabelle 2.1 : Versuchsparameter

Versuchskörper	b_l	t_l	A_l	η	a/h_s	$a_{l\text{ links}}$	$a_{l\text{ rechts}}$
	mm	mm	cm ²	-	-	cm	cm
DB02	80	3	2,4	1,5	5,2	60	80
DB04	80	5	4,0	2,0	5,2	80	100
DB06	40	6	2,4	1,5	5,2	110	110
DB08	40	8	3,2	1,7	5,2	110	120
DB09	40	4	1,6	1,2	5,2	80	100
DB10	80	3	2,4	1,5	5,2	70	90
DB11	60	3,5	2,1	1,4	5,2	70	90
SB01	60	8	4,8	2,2	5,2	100	120
SB02	120	4	4,8	2,2	5,2	100	120
SB03	40	10	4,0	2,0	5,2	100	120
SB04	80	5	4,0	2,0	5,2	100	120
SB05	40	10	4,0	2,0	4,0	70	90
SB06	80	5	4,0	2,0	4,0	70	90



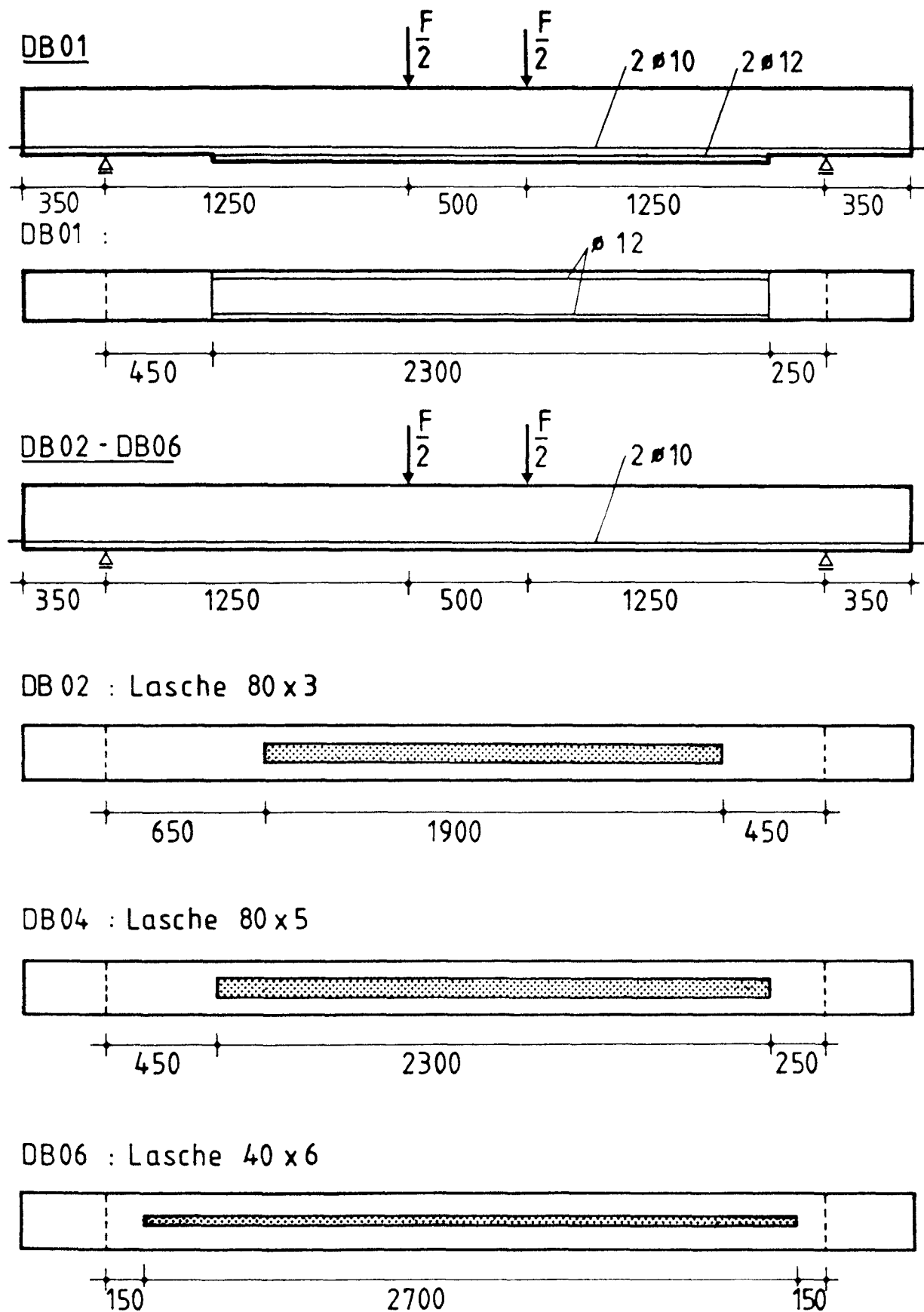
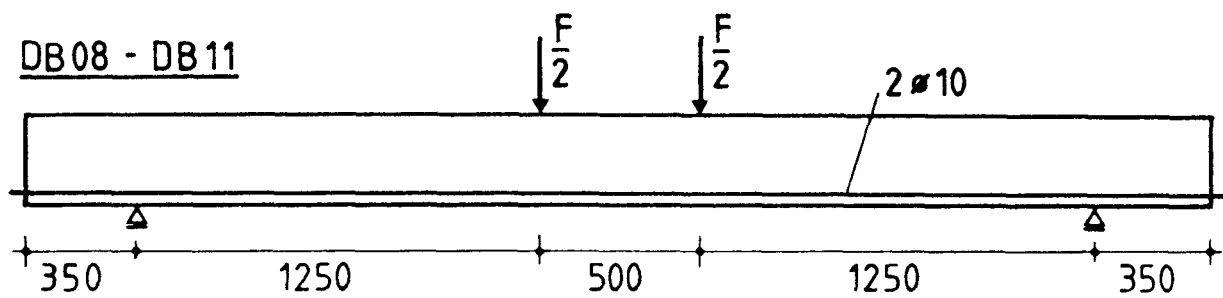
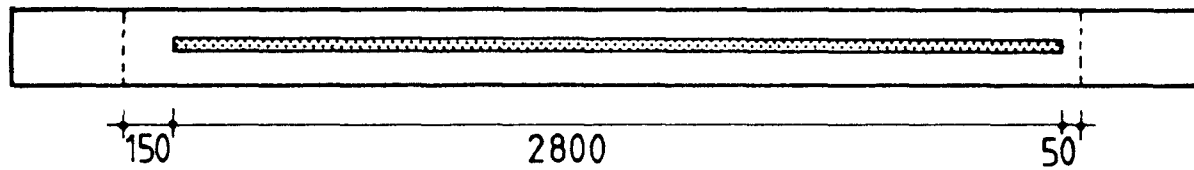


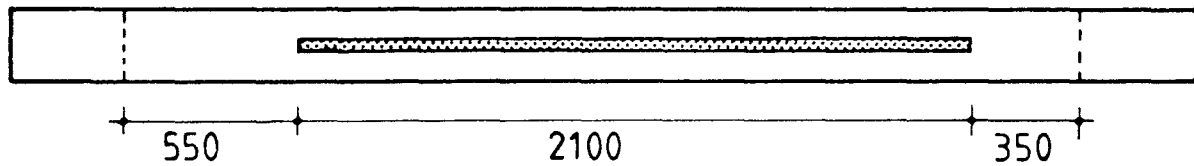
Bild 2.4 : Anordnung der unteren Längsbewehrung und der Laschen
-Balken DB01-DB06



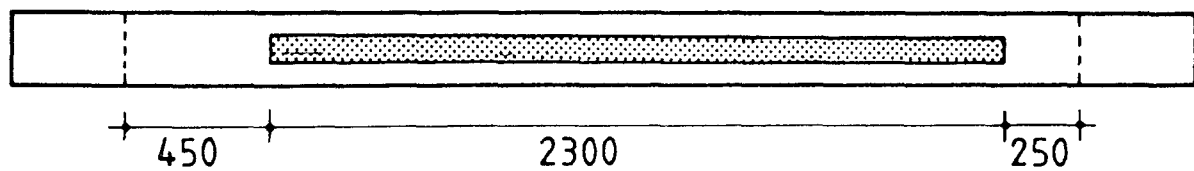
DB 08 : Lasche 40 x 8



DB 09 : Lasche 40 x 4



DB 10 : Lasche 80 x 3



DB 11 : Lasche 60 x 3,5

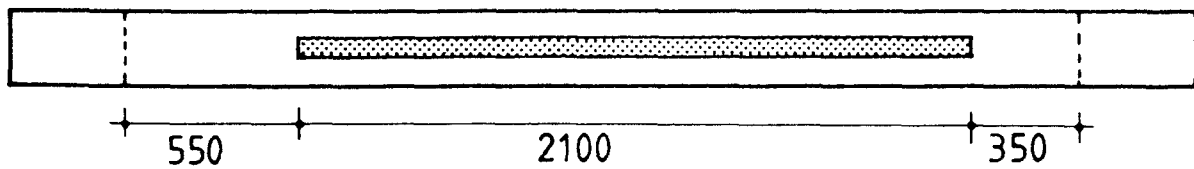
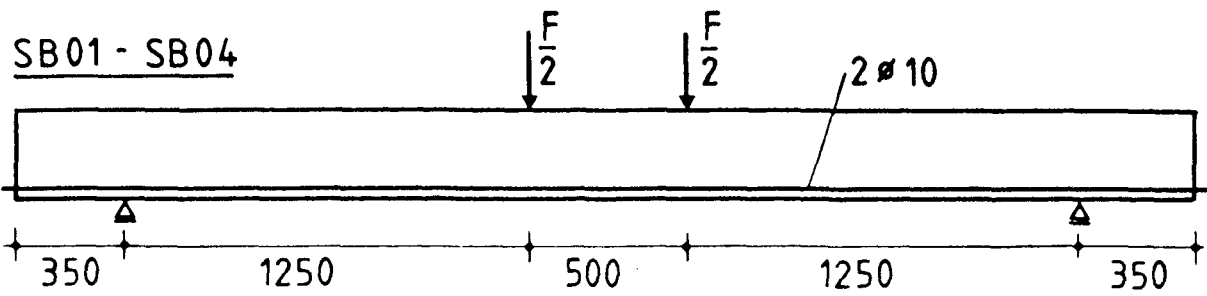
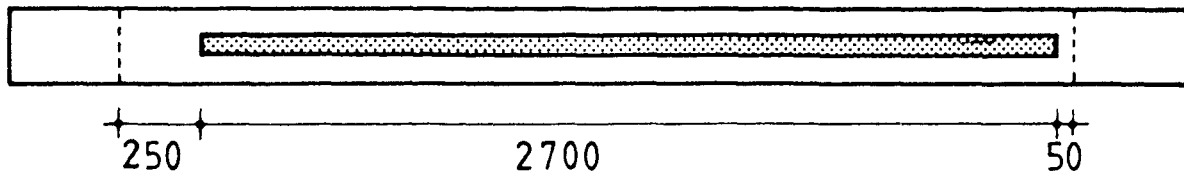


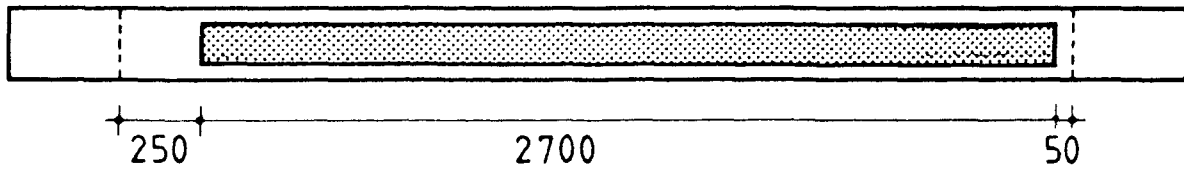
Bild 2.5 : Anordnung der unteren Längsbewehrung und der Laschen
-Balken DB08-DB11



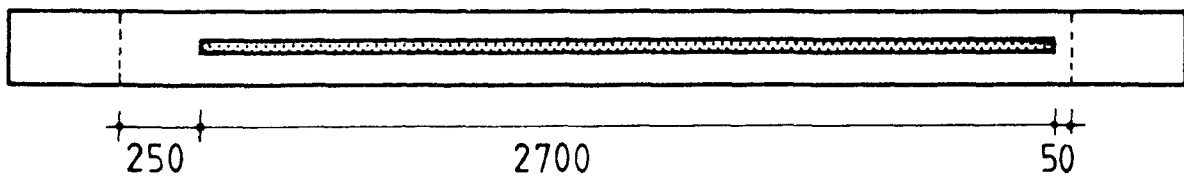
SB01 : Lasche 60 x 8



SB02 : Lasche 120 x 4



SB03 : Lasche 40 x 10



SB04 : Lasche 80 x 5

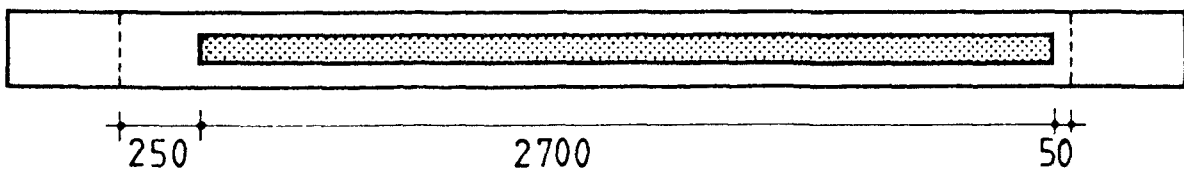
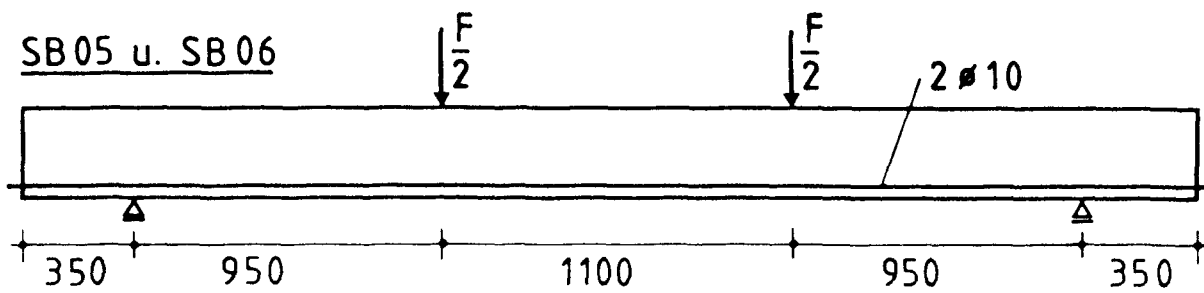
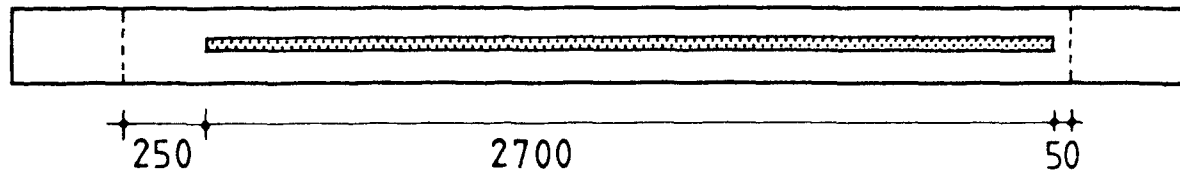


Bild 2.6 : Anordnung der unteren Längsbewehrung und der Laschen
-Balken SB01-SB04



SB 05 : Lasche 40x10



SB 06 : Lasche 80x5

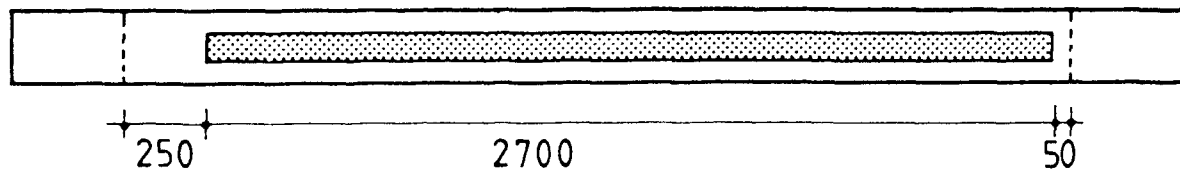


Bild 2.7 : Anordnung der unteren Längsbewehrung und der Laschen
-Balken SB05-SB06

Tabelle 3.1 : Zusammensetzung des verwendeten Betons und Prüfergebnisse (Begleitversuche)

		DB01	DB02	DB04	DB06	DB08	DB09	DB10	DB11
Mischungsverhältnis (Zement:Zuschlag:Wasser) in Gewichtsanteilen	-	1:6,0:0,47	1:6,0:0,50	1:6,0:0,47	1:6,0:0,50	1:6,0:0,49	1:6,0:0,49	1:6,0:0,49	1:6,0:0,49
Zementgehalt (PZ 35F)	kg/m ³	320	320	320	320	320	320	320	320
Zuschlag in GT	%	40	40	40	40	40	40	40	40
0/2	%	35	35	35	35	35	35	35	35
2/8	%	15	15	15	15	15	15	15	15
8/16	%	10	10	10	10	10	10	10	10
16/32	%								
Ausbreitmaß a	cm	34	37	32,5	35,5	37	37,5	34	35
Verdichtungsmaß v	-	1,05	1,08	1,10	1,06	1,09	1,09	1,08	1,09
Frischbetonrohddichte	MN/m ³	2,38	2,38	2,38	2,37	2,38	2,36	2,36	2,36
Würfeldruckfestigkeit β_{W15}									
nach 28 Tagen	N/mm ²	46	50	46	50	46	37	44	45
bei Versuchsdurchführung	N/mm ²	50	49	51	47	49	49	47	50
E-Modul bei Versuchsdurchführung	N/mm ²	28300	25800	28600	27100	27500	26200	25700	25300
Spaltzugfestigkeit bei Versuchsdurchführung	N/mm ²	2,58	3,03	3,16	2,68	2,92	2,88	2,81	3,18
Alter des Versuchskörpers bei Versuchsdurchführung	Tage	42	76	75	96	70	90	92	110

Tabelle 3.2 : Zusammensetzung des verwendeten Betons und Prüfergebnisse (Begleitversuche)

		SB01	SB02	SB03	SB04	SB05	SB06
Mischungsverhältnis (Zement:Zuschlag:Wasser) in Gewichtsanteilen	-	1:6,0:0,52	1:6,0:0,52	1:6,0:0,55	1:6,0:0,55	1:6,0:0,47	1:6,0:0,47
Zementgehalt (PZ 35F)	kg/m ³	320	320	320	320	320	320
Zuschlag in GT	%	40	40	40	40	40	40
0/2	%	35	35	35	35	35	35
2/8	%	15	15	15	15	15	15
8/16	%	10	10	10	10	10	10
16/32							
Ausbreitmaß a	cm	38	39	41	40	36	36
Verdichtungsmaß v	-	1,07	1,07	1,05	1,05	1,04	1,05
Frischbetonrohddichte	MN/m ³	2,37	2,38	2,37	2,37	2,35	2,35
Würfeldruckfestigkeit β_{W15} nach 28 Tagen	N/mm ²	45	43	38	44	43	46
bei Versuchsdurchführung	N/mm ²	49	44	44	48	52	49
E-Modul bei Versuchsdurchführung	N/mm ²	29400	28000	28200	27100	29200	28800
Spaltzugfestigkeit bei Versuchsdurchführung	N/mm ²	3,00	3,00	2,86	3,04	3,30	2,95
Alter des Versuchskörpers bei Versuchsdurchführung	Tage	112	123	117	137	149	191

Tabelle 3.3 : Materialkennwerte des verwendeten Betonstahls (BSt 500)

		DB01	DB02-DB11	SB01-SB06
Innenbewehrung oben				
Ø	mm	5,47	5,47	5,47
Querschnitt	mm ²	23,43	23,43	23,43
R _{p0,2}	N/mm ²	600	600	600
R _m	N/mm ²	612	612	612
E _s	N/mm ²	2,1·10 ⁵	2,1·10 ⁵	2,1·10 ⁵
Innenbewehrung unten obere Lage				
Ø	mm	10,03	10,03	10,00
Querschnitt	mm ²	78,99	78,99	78,44
R _{p0,2}	N/mm ²	604	604	584
R _m	N/mm ²	681	681	701
E _s	N/mm ²	1,98·10 ⁵	1,98·10 ⁵	2,01·10 ⁵
Innenbewehrung unten untere Lage				
Ø	mm	11,73	-	-
Querschnitt	mm ²	108,05	-	-
R _{p0,2}	N/mm ²	554	-	-
R _m	N/mm ²	689	-	-
E _s	N/mm ²	2,03·10 ⁵	-	-

Tabelle 3.4 : Materialkennwerte des verwendeten Laschenstahls (St 37-2)

Versuchskörper	t _l	b _l	A _l	R _e	R _m	E _l
	mm	mm	mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
DB01	-	-	-	-	-	-
DB02	2,98	78,60	234,23	282	401	2,20·10 ⁵
DB04	5,04	79,90	402,70	327	437	2,10·10 ⁵
DB06	6,14	40,20	246,83	330	468	2,03·10 ⁵
DB08	8,04	39,80	320,00	338	483	2,05·10 ⁵
DB09	3,98	39,00	155,22	329	460	2,06·10 ⁵
DB10	2,98	78,60	234,23	282	401	2,20·10 ⁵
DB11	3,54	61,00	215,94	239	368	1,97·10 ⁵
SB01	7,89	60,30	475,80	297	419	2,00·10 ⁵
SB02	3,88	119,80	464,80	293	437	2,10·10 ⁵
SB03	9,95	40,30	401,00	278	394	2,00·10 ⁵
SB04	5,02	79,80	400,60	317	424	2,00·10 ⁵
SB05	9,95	40,30	401,00	278	394	2,00·10 ⁵
SB06	5,02	79,80	400,60	317	424	2,00·10 ⁵

Tabelle 3.5 : Eigenschaften des Klebstoffes

		Einheit	Klebstoff
Topfzeit bei 20°C		Min.	30 *)
Druckfestigkeit	DIN 53454	N/mm ²	75 *)
	DIN 1164	N/mm ²	>80
Zugfestigkeit	DIN 53455	N/mm ²	19 *)
Biegezugfestigkeit	DIN 1164	N/mm ²	25
E-Modul	DIN 53457	N/mm ²	5780 *)
G-Modul	DIN 53445	N/mm ²	~2500 *)
	DIN 54451	N/mm ²	~ 770
Ausgehärtet ab		°C	10 *)

*) nach Angabe des Herstellers

Tabelle 3.6 : Ergebnisse der Klebstoffprüfung

Prisma	Biegezug- festigkeit	Druckfestigkeit		
		Würfel 1	Würfel 2	Mittelwert
Nr.	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1	34,0	80,0	81,0	80,5
2	26,8	80,8	80,2	80,5
i.M.	30,4	-	-	80,5

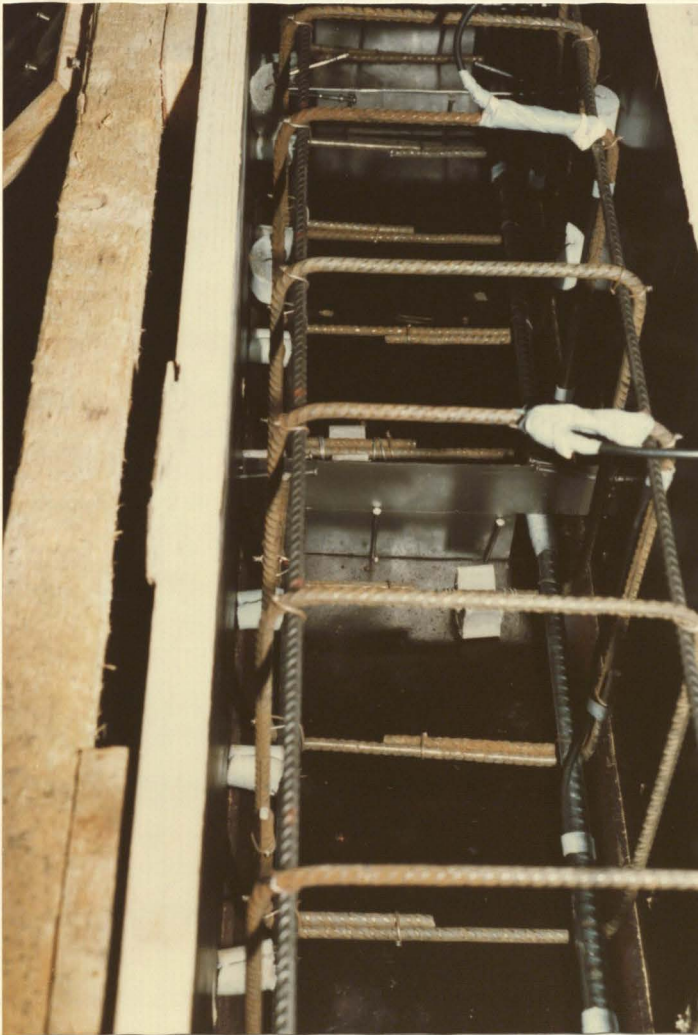


Bild 4.1 : Schalungskörper mit Bewehrung vor der Betonage

Tabelle 5.1 : Mit tatsächlichen Querschnitts- und Festigkeitswerten errechnete Bewehrungsgrade

Versuchs- körper	$b_l \cdot t_l$	$\frac{M}{Q \cdot h_s}$	μ_s	μ_s	tot μ	tot ω
-	mm • mm	-	%	%	%	-
DB01	-	5,2	0,80	-	0,80	0,138
DB02	80x3	5,2	0,29	0,43	0,49	0,086
DB04	80x5	5,2	0,29	0,75	0,69	0,117
DB06	40x6	5,2	0,29	0,46	0,54	0,099
DB08	40x8	5,2	0,29	0,59	0,62	0,109
DB09	40x4	5,2	0,29	0,29	0,45	0,079
DB10	80x3	5,2	0,29	0,43	0,49	0,090
DB11	60x3,5	5,2	0,29	0,40	0,45	0,078
SB01	60x8	5,2	0,29	0,88	0,74	0,126
SB02	120x4	5,2	0,29	0,86	0,72	0,137
SB03	40x10	5,2	0,29	0,74	0,64	0,121
SB04	80x5	5,2	0,29	0,74	0,69	0,120
SB05	40x10	4,0	0,29	0,74	0,64	0,103
SB06	80x5	4,0	0,29	0,74	0,69	0,117

Tabelle 5.2 : Nach DIN 1045 und Zulassung errechnete Schnitt- und Belastungsgrößen

Versuchs- körper	$M_{u05\%}$	$M_{uV2\%}$	η	$F_{uV2\%}$	zul.M	zugeh. Q_A	τ_0	SB	v	$M_{uV5\%}$	$F_{uV5\%}$
-	kNm	kNm	-	kN	kNm	kN	MN/m ²	-	cm	kNm	kN
DB01	17,72	34,72	2,0	53,01	19,84	18,05	0,42	(1b)	24	45,06	69,6
DB02	17,72	26,12	1,5	39,25	14,93	14,13	0,33	(1a)	24	31,82	48,4
DB04	17,72	34,96	2,0	53,39	19,98	18,17	0,42	(1b)	24	41,10	63,2
DB06	17,72	26,12	1,5	39,25	14,93	14,13	0,33	(1a)	24	31,90	48,5
DB08	17,72	30,57	1,7	46,37	17,47	16,16	0,37	(1a)	24	36,62	56,0
DB09	17,72	21,60	1,2	32,02	12,34	12,05	0,27	(1a)	24	27,17	40,9
DB10	17,72	26,12	1,5	39,25	14,93	14,13	0,33	(1a)	24	31,82	48,4
DB11	17,72	24,41	1,4	36,51	13,95	13,34	0,30	(1a)	24	30,10	45,6
SB01	17,72	39,39	2,2	60,48	22,51	20,19	0,47	1	18	45,79	70,7
SB02	17,72	39,28	2,2	60,30	22,45	20,14	0,47	1	18	45,57	70,4
SB03	17,72	35,07	2,0	53,57	20,04	18,21	0,42	1	18	41,32	63,6
SB04	17,72	34,96	2,0	53,39	19,98	18,17	0,42	1	18	41,10	63,2
SB05	17,72	35,07	2,0	70,52	20,04	23,48	0,54	1	18	41,32	83,7
SB06	17,72	34,96	2,0	70,29	19,98	23,42	0,54	1	18	41,10	83,2

Tabelle 5.3 : Mit tatsächlichen Querschnitts- und Festigkeitswerten errechnete Schnitt- und Belastungsgrößen

Versuchskörper	β_R	$M_{uV2\%}$	$M_{uV5\%}$	Lastfall 1		Lastfall 2	
				$F_{uV2\%}$	$F_{uV5\%}$	$F_{uV2\%}$	$F_{uV5\%}$
-	N/mm ²	kNm	kNm	kN	kN	kN	kN
DB01	42,5	33,5	51,3	51,0	79,5	96,0	145,8
DB02	41,6	28,3	38,2	42,7	58,6	81,4	109,2
DB04	43,3	44,1	54,5	68,0	84,7	125,7	154,8
DB06	40,0	32,0	42,1	48,7	64,8	91,8	120,1
DB08	41,6	38,5	48,8	59,1	75,5	110,0	138,8
DB09	41,6	24,6	34,5	36,8	52,7	71,1	98,8
DB10	40,0	28,2	38,1	42,6	58,4	81,2	108,9
DB11	42,5	24,8	34,6	37,2	52,8	71,6	99,1
SB01	41,6	46,4	56,2	71,8	87,4	132,1	159,6
SB02	37,4	44,8	54,4	69,2	84,5	127,6	154,5
SB03	37,4	39,2	48,7	60,1	75,4	112,0	138,6
SB04	40,8	42,9	52,5	66,2	81,5	122,3	149,2
SB05	44,2	39,5	49,1	79,8	100,1	77,1	95,9
SB06	41,6	42,9	52,5	87,0	107,2	83,8	102,6

Tabelle 5.4 : Ermittlung der aufnehmbaren Laschenzugkräfte und der daraus resultierenden maximalen Biegemomente und Pressenkräfte nach Zulassung /22/

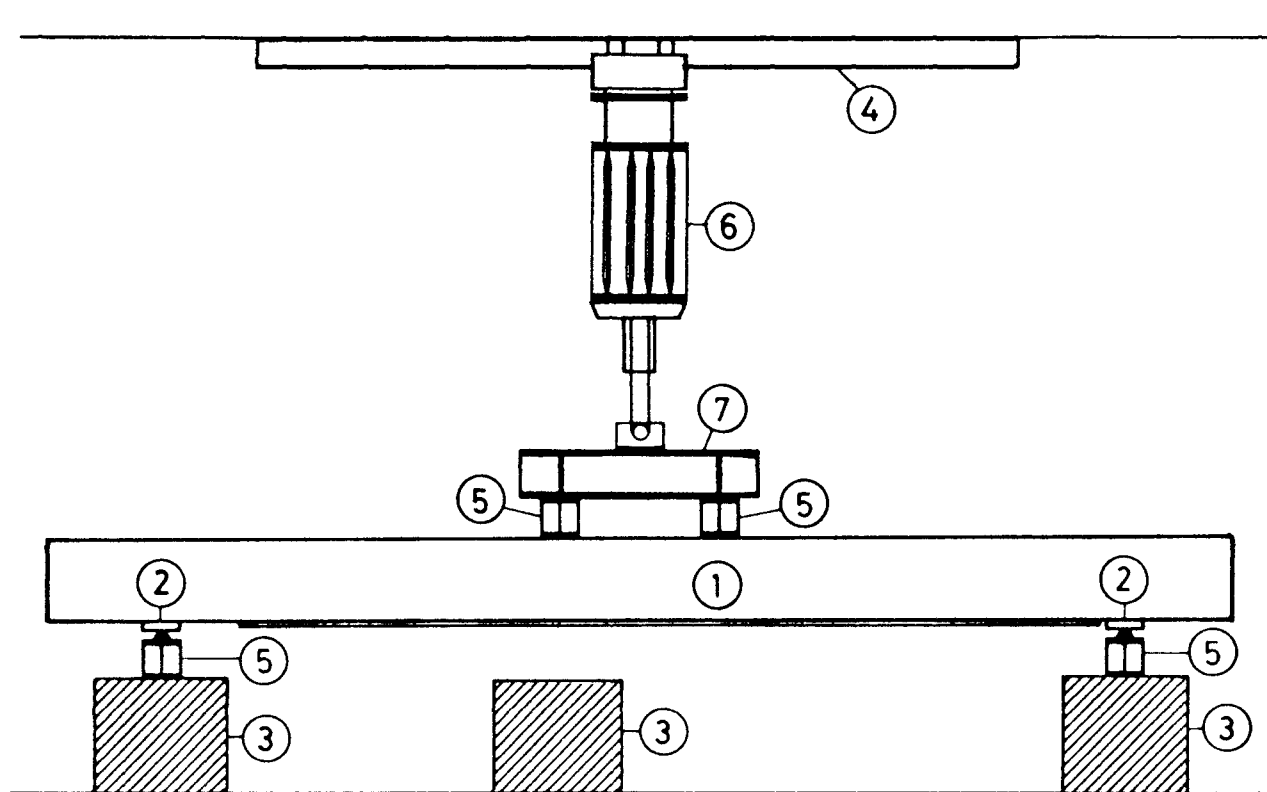
Versuchs- körper	Lastfall 1					Lastfall 2					Z _{1S}
	l _{Vlinks}	Z _{1u}	ε _l	M _{uV}	F _{uV}	l _{Vrechts}	Z _{1u}	ε _l	M _{uV}	F _{uV}	
-	cm	kN	‰	kNm	kN	cm	kN	‰	kNm	kN	kN
DB02	34	47,5	0,92	17,16	24,9	54	59,8	1,16	21,59	62,7	66,1
DB04	54	79,1	0,94	25,04	37,5	74	92,6	1,09	28,97	83,3	131,7
DB06	84	54,8	1,09	19,99	29,4	84	54,8	1,09	19,99	58,2	81,5
DB08	84	62,1	0,95	20,97	31,0	94	65,6	1,00	22,09	64,1	108,2
DB09	44	31,0	0,97	13,39	18,9	64	37,3	1,17	16,28	47,8	51,1
DB10	54	59,8	1,16	21,62	32,0	74	(70,0)	Fließen der Lasche			<u>66,1</u>
DB11	44	45,7	1,07	17,68	25,7	64	(55,1)	Fließen der Lasche			<u>51,6</u>
SB01	80	90,9	0,96	27,86	42,0	100	101,6	1,07	31,13	89,4	141,3
SB02	80	126,6	1,30	37,97	58,2	100	(141,6)	Fließen der Lasche			<u>136,2</u>
SB03	80	68,2	0,85	21,65	32,1	100	76,3	0,95	24,15	69,8	111,5
SB04	80	96,0	1,20	30,41	46,1	100	107,3	1,34	34,10	97,7	127,0
SB05	50	53,9	0,67	17,03	32,5	70	63,8	0,80	20,58	40,0	111,5
SB06	50	75,9	0,95	24,27	47,8	70	89,8	1,12	28,54	55,6	127,0

Tabelle 5.5 : Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit nach DIN 1045

Versuchs- körper	Lastfall 1			Lastfall 2 rechtes Auflager		
	τ_u	Q_u	F_u	τ_u	Q_u	F_u
-	MN/m ²	kN	kN	MN/m ²	kN	kN
DB01-DB11	0,84	34,3	64,2	0,84	34,3	119,1
SB01-SB04	2,44	99,6	194,8	2,44	99,6	347,6
SB05/SB06	2,44	99,6	194,4	2,44	99,6	183,9

Tabelle 5.6 : Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit nach RAFLA /23/

Versuchskörper	Lastfall 1							Lastfall 2 rechtes Auflager	
	B_w	$f(\lambda_s)$	τ_{u0}	τ_{u1}	τ_u	Q_u	F_u	Q_u	F_u
-	kp/cm ²	-	MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²	kN	kN	kN	kN
DB01	500	0,744	0,92	-	0,92	38,6	72,8	38,6	134,1
DB02	490	0,744	0,91	-	0,91	38,2	72,0	38,2	132,7
DB04	510	0,744	0,93	-	0,93	39,1	73,8	39,1	135,9
DB06	470	0,744	0,89	-	0,89	37,4	70,4	37,4	129,9
DB08	490	0,744	0,91	-	0,91	38,2	72,0	38,2	132,7
DB09	490	0,744	0,91	-	0,91	38,2	72,0	38,2	132,7
DB10	470	0,744	0,89	-	0,89	37,4	70,4	37,4	129,9
DB11	500	0,744	0,92	-	0,92	38,6	72,8	38,6	134,1
SB01	490	0,744	0,91	2,04	2,10	88,2	172,0	88,2	307,7
SB02	440	0,744	0,86	2,04	2,01	84,4	164,4	84,4	294,4
SB03	440	0,744	0,86	2,04	2,01	84,4	164,4	84,4	294,4
SB04	480	0,744	0,90	2,04	2,08	87,4	170,4	87,4	304,9
SB05	520	0,780	0,98	2,04	2,23	93,7	182,6	93,7	172,9
SB06	490	0,780	0,96	2,04	2,19	92,0	179,2	92,0	169,7



- ① Versuchskörper
- ② Rollenlager
- ③ Betonblöcke z. Auflagerung
- ④ Stahlträger zum Verfahren der Presse
- ⑤ Lasteinleitungsträger
- ⑥ Hydraulische Presse
- ⑦ Lastverteilungsträger

Lage des Versuchskörpers :

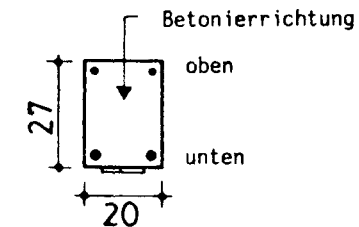


Bild 6.1 : Versuchseinrichtung, Lastfall 1 (LF1)

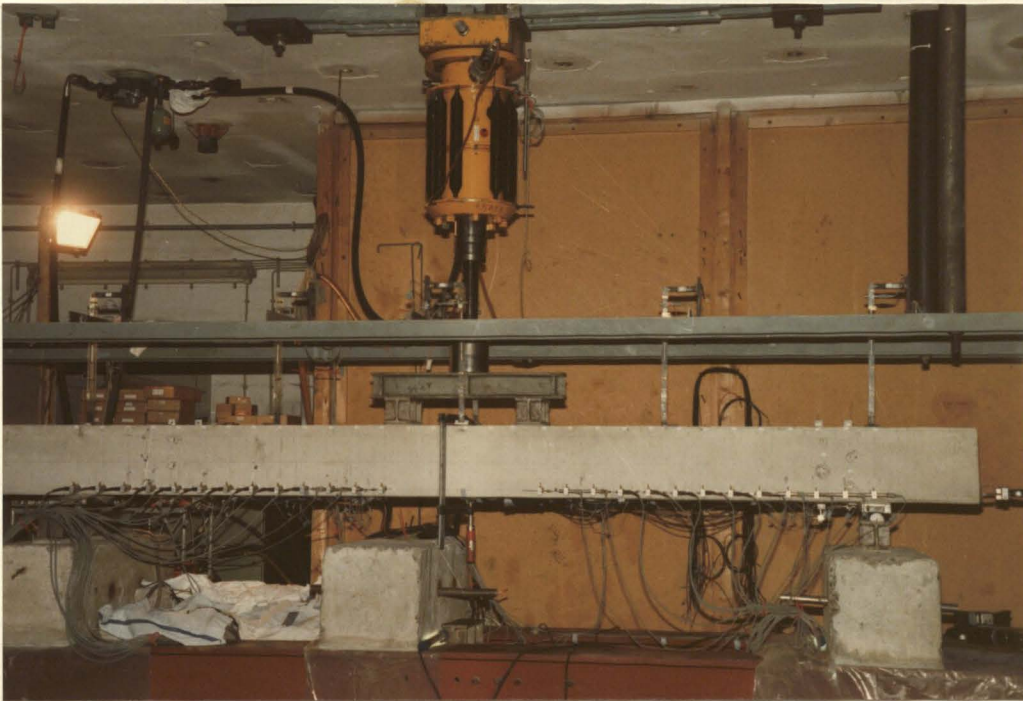


Bild 6.2 : Versuchseinrichtung im Lastfall 1 (LF1)

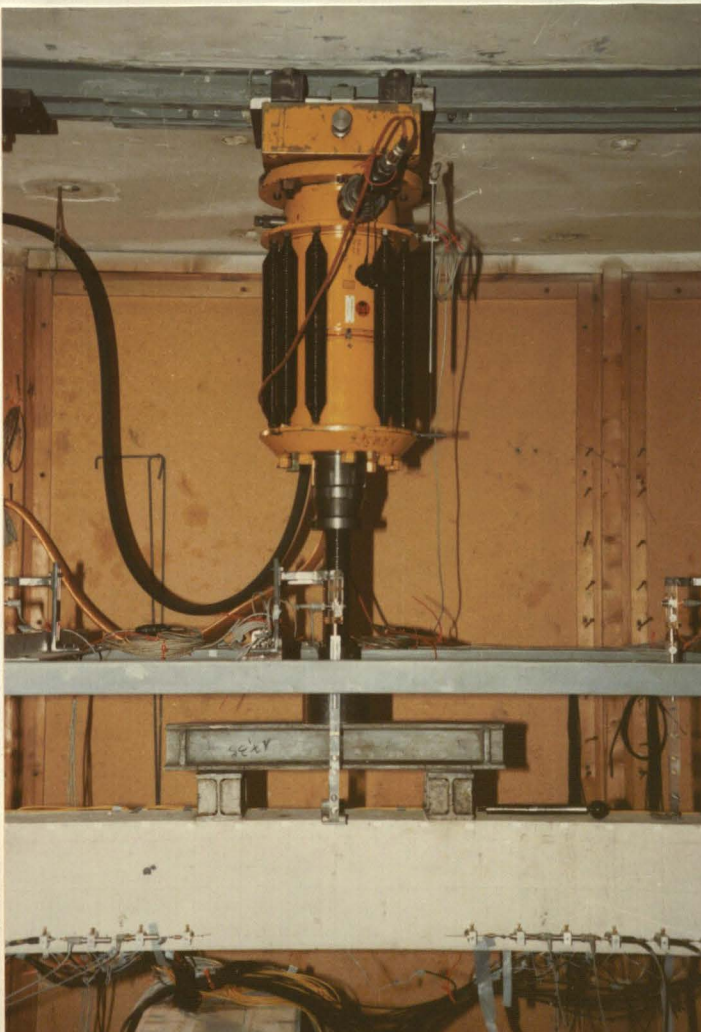
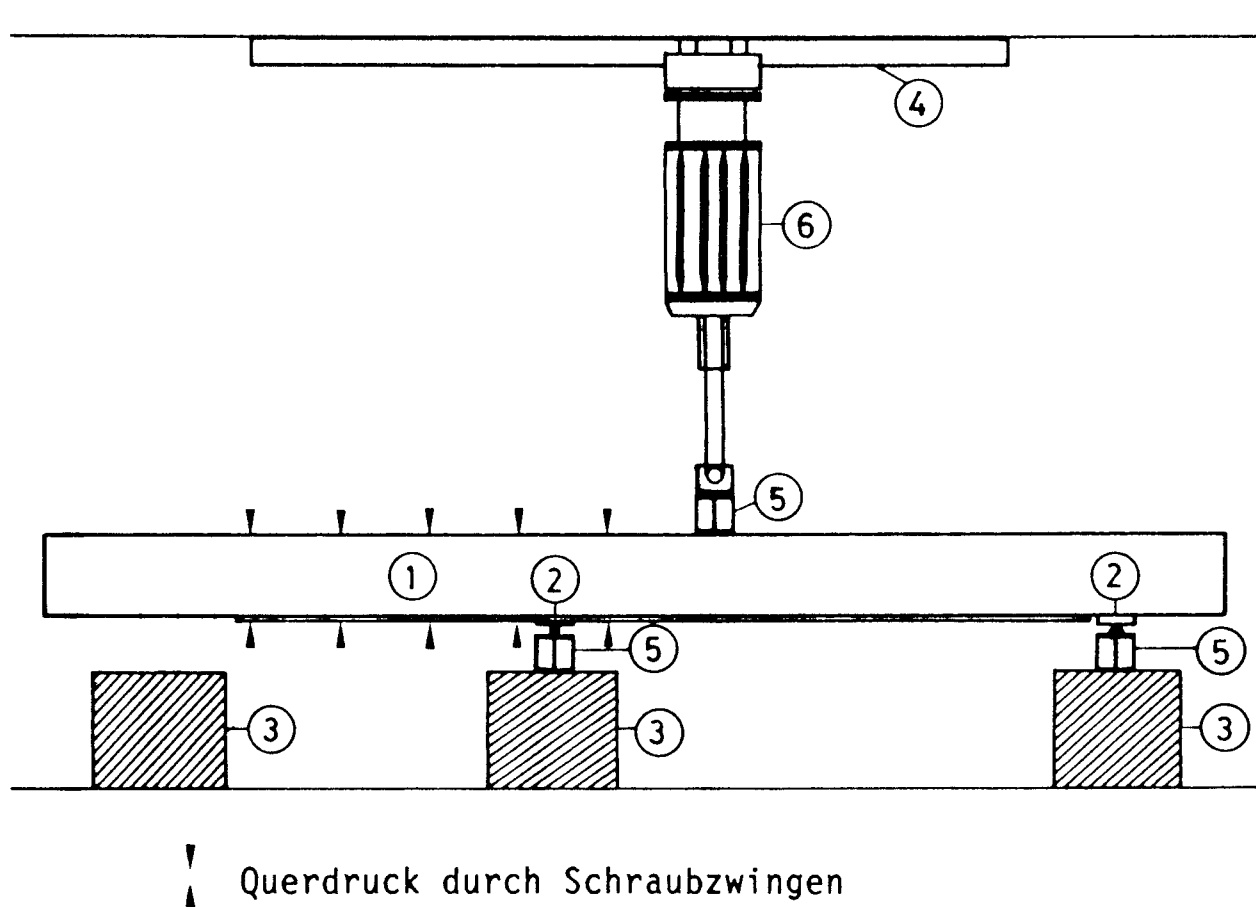


Bild 6.3 : Belastungseinrichtung im Lastfall 1 (LF1)



- ① Versuchskörper
- ② Rollenlager
- ③ Betonblöcke z. Auflagerung
- ④ Stahlträger zum Verfahren der Presse
- ⑤ Lasteinleitungsträger
- ⑥ Hydraulische Presse

Lage des Versuchskörpers :

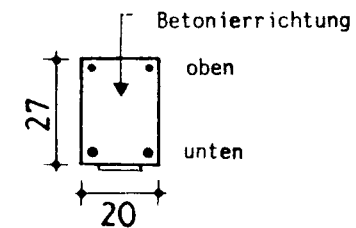
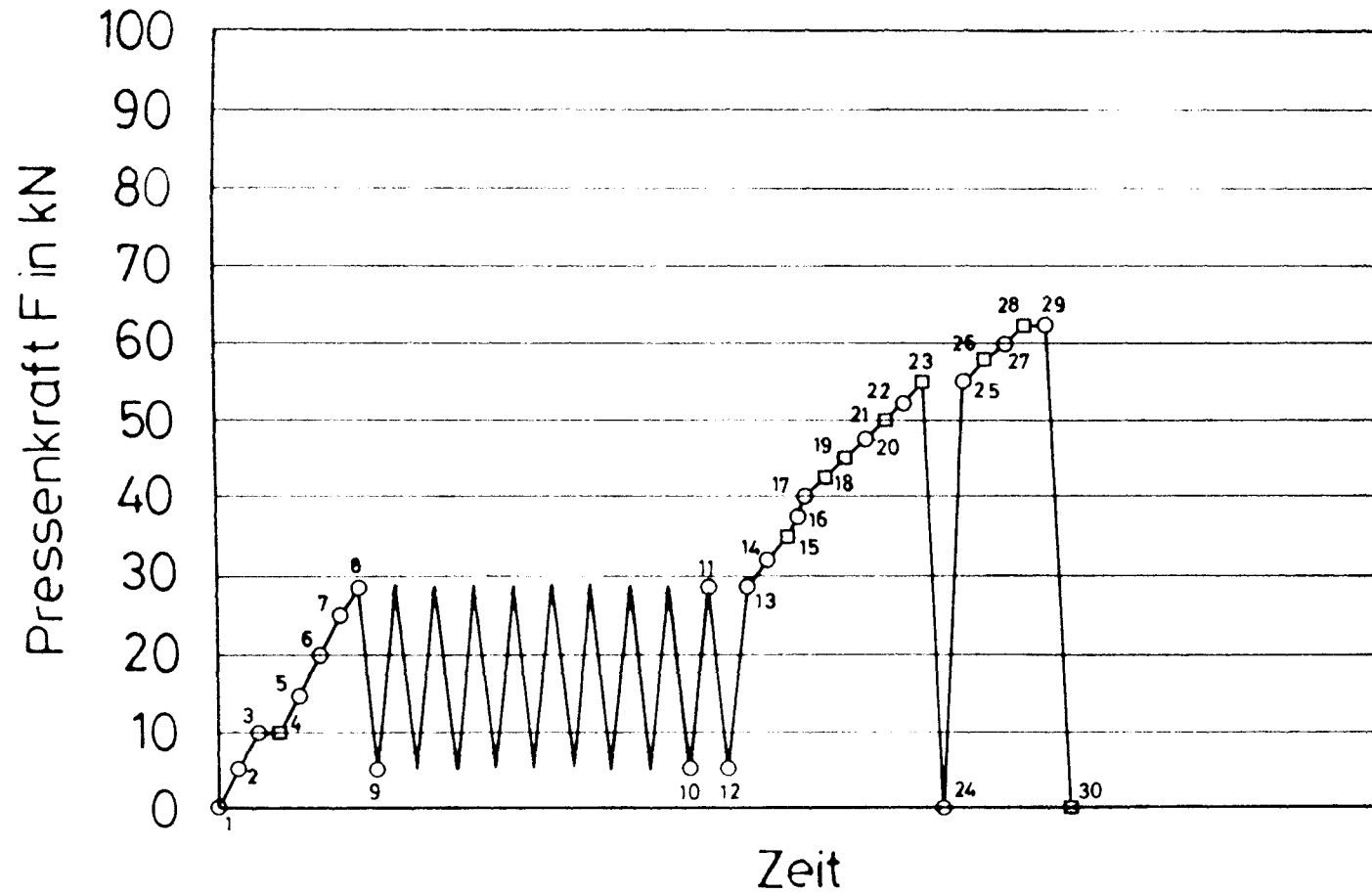


Bild 6.4 : Versuchseinrichtung, Lastfall 2 (LF2)



LS	F	LS	F
LS 1	0.0	LS 24	0.0
LS 2	5.0	LS 25	55.0
LS 3	10.0	LS 26	57.5
LS 4	10.0	LS 27	60.0
LS 5	15.0	LS 28	62.5
LS 6	20.0	LS 29	62.5
LS 7	25.0	LS 30	0.0
LS 8	28.9		
LS 9	5.2		
LS 10	5.2		
LS 11	28.9		
LS 12	5.2		
LS 13	28.9		
LS 14	32.5		
LS 15	35.0		
LS 16	37.5		
LS 17	40.0		
LS 18	42.5		
LS 19	45.0		
LS 20	47.5		
LS 21	50.0		
LS 22	52.5		
LS 23	55.0		

Bild 6.5 : Laststufenplan — Balken DB01, Lastfall 1 (LF1)

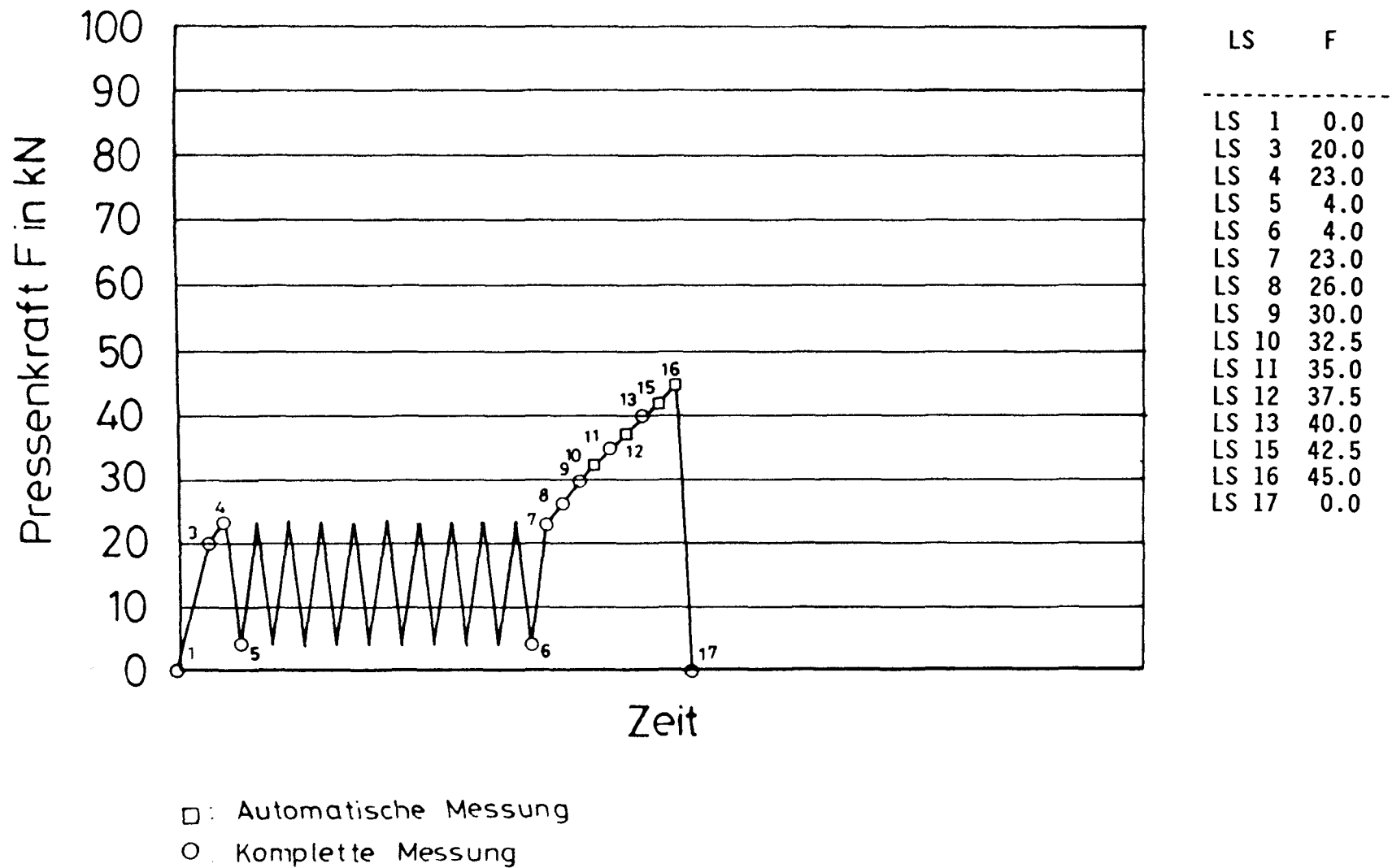
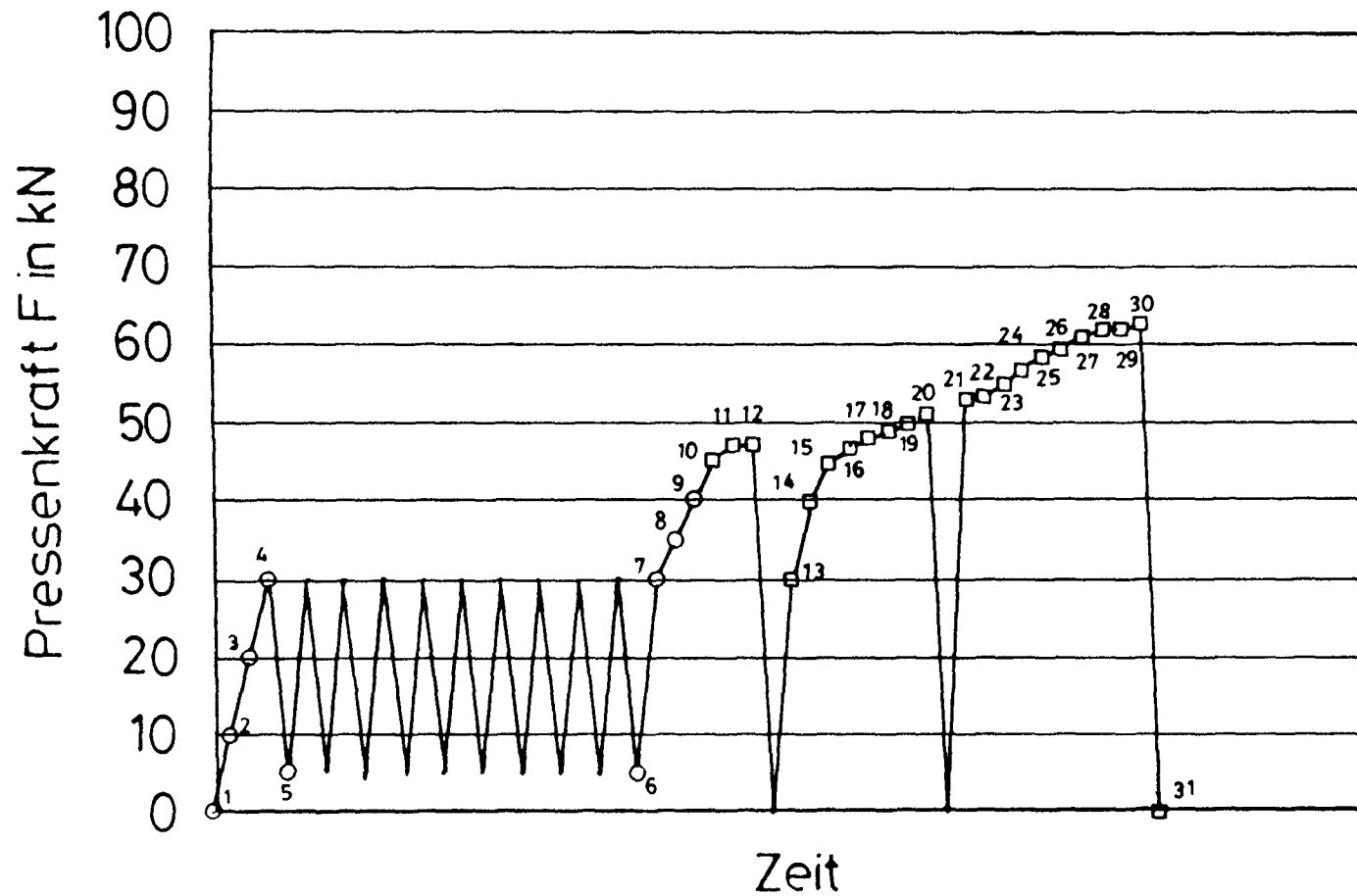


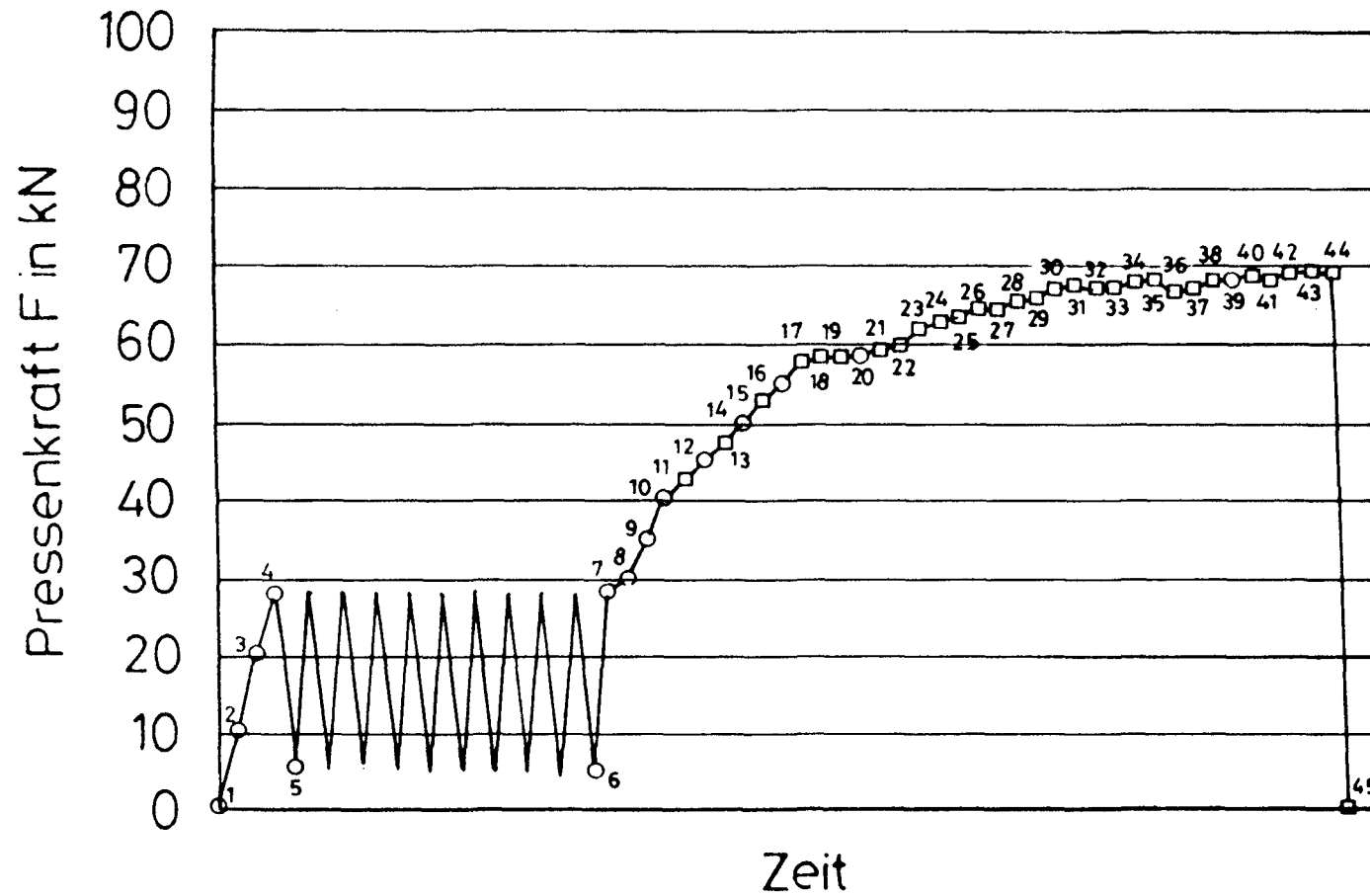
Bild 6.6 : Laststufenplan — Balken DB02 Lastfall 1 (LF1)



□: Automatische Messung
○: Komplette Messung

LS	F	LS	F
LS 1	0.0	LS 24	57.1
LS 2	10.0	LS 25	58.5
LS 3	20.0	LS 26	59.5
LS 4	30.0	LS 27	61.1
LS 5	5.0	LS 28	62.0
LS 6	5.0	LS 29	61.8
LS 7	30.0	LS 30	62.7
LS 8	35.0	LS 31	0.0
LS 9	40.0		
LS 10	45.0		
LS 11	47.0		
LS 12	47.0		
LS 13	30.0		
LS 14	40.0		
LS 15	45.0		
LS 16	47.0		
LS 17	48.0		
LS 18	49.0		
LS 19	50.0		
LS 20	51.0		
LS 21	53.0		
LS 22	53.2		
LS 23	55.0		

Bild 6.7 : Laststufenplan — Balken DB 04, Lastfall 1 (LF1)



LS	F	LS	F
LS 1	0.0	LS 24	62.5
LS 2	10.0	LS 25	63.1
LS 3	20.0	LS 26	64.2
LS 4	27.4	LS 27	63.9
LS 5	5.0	LS 28	65.2
LS 6	5.0	LS 29	65.5
LS 7	27.3	LS 30	66.7
LS 8	30.0	LS 31	67.5
LS 9	35.0	LS 32	67.0
LS 10	40.0	LS 33	67.0
LS 11	42.5	LS 34	67.7
LS 12	45.0	LS 35	68.0
LS 13	47.5	LS 36	66.6
LS 14	50.0	LS 37	67.0
LS 15	52.5	LS 38	68.0
LS 16	55.0	LS 39	68.0
LS 17	57.5	LS 40	68.7
LS 18	57.6	LS 41	68.0
LS 19	58.3	LS 42	69.0
LS 20	58.3	LS 43	69.2
LS 21	59.0	LS 44	69.0
LS 22	59.7	LS 45	0.0
LS 23	61.4		

Bild 6.8 : Laststufenplan — Balken DB06, Lastfall 1 (LF1)

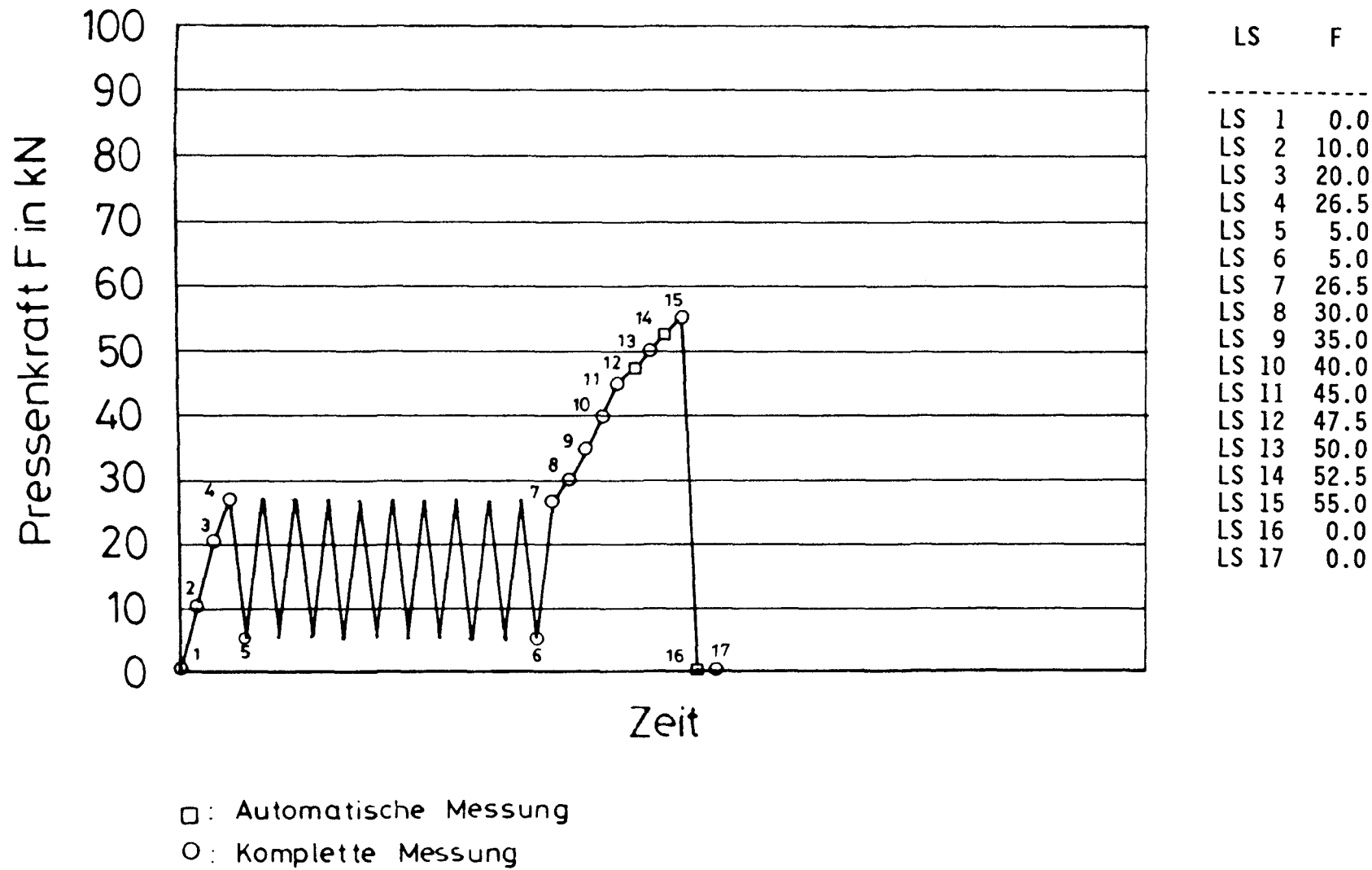


Bild 6.9 : Laststufenplan — Balken DB08, Lastfall 1 (LF1)

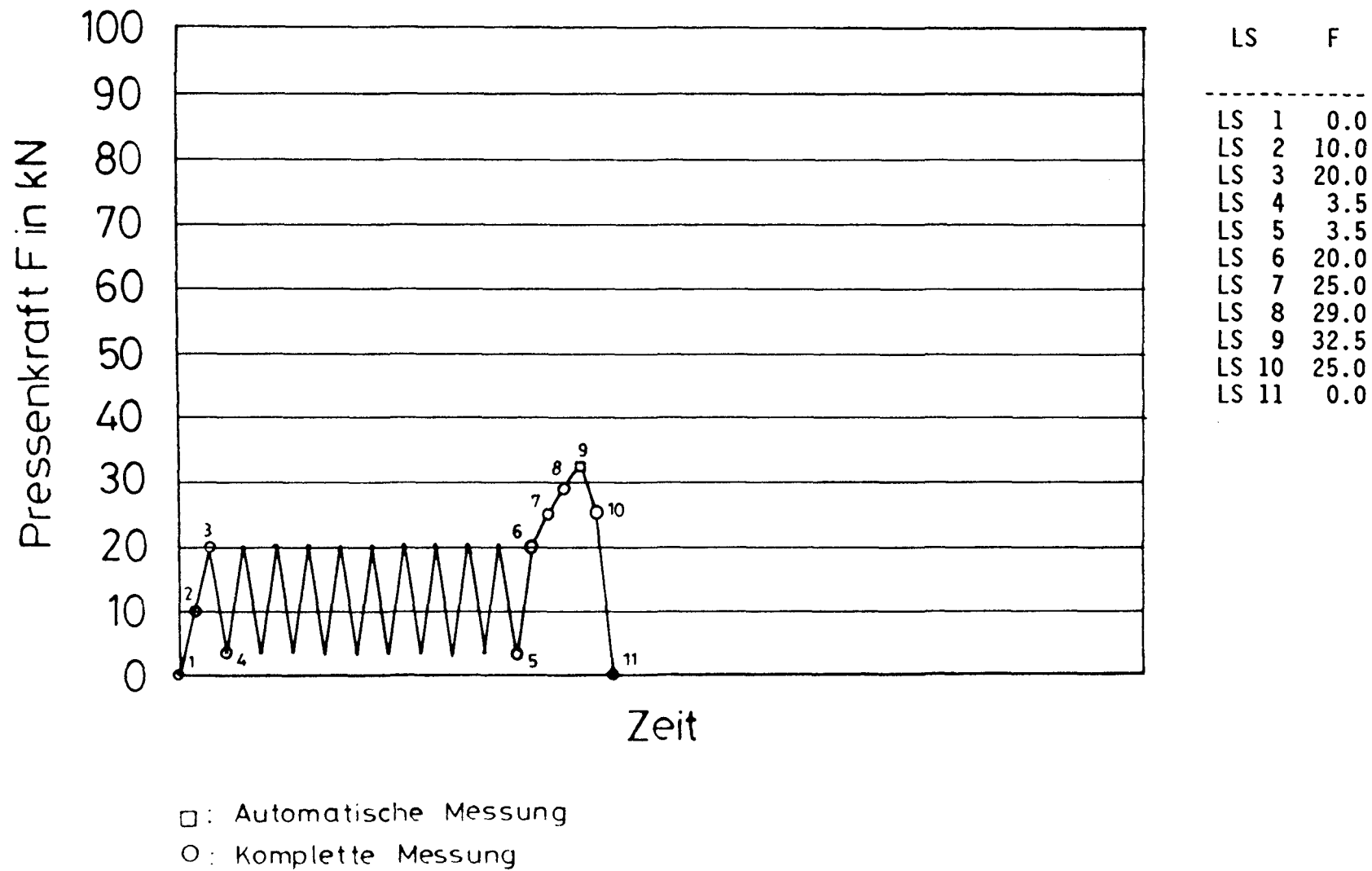
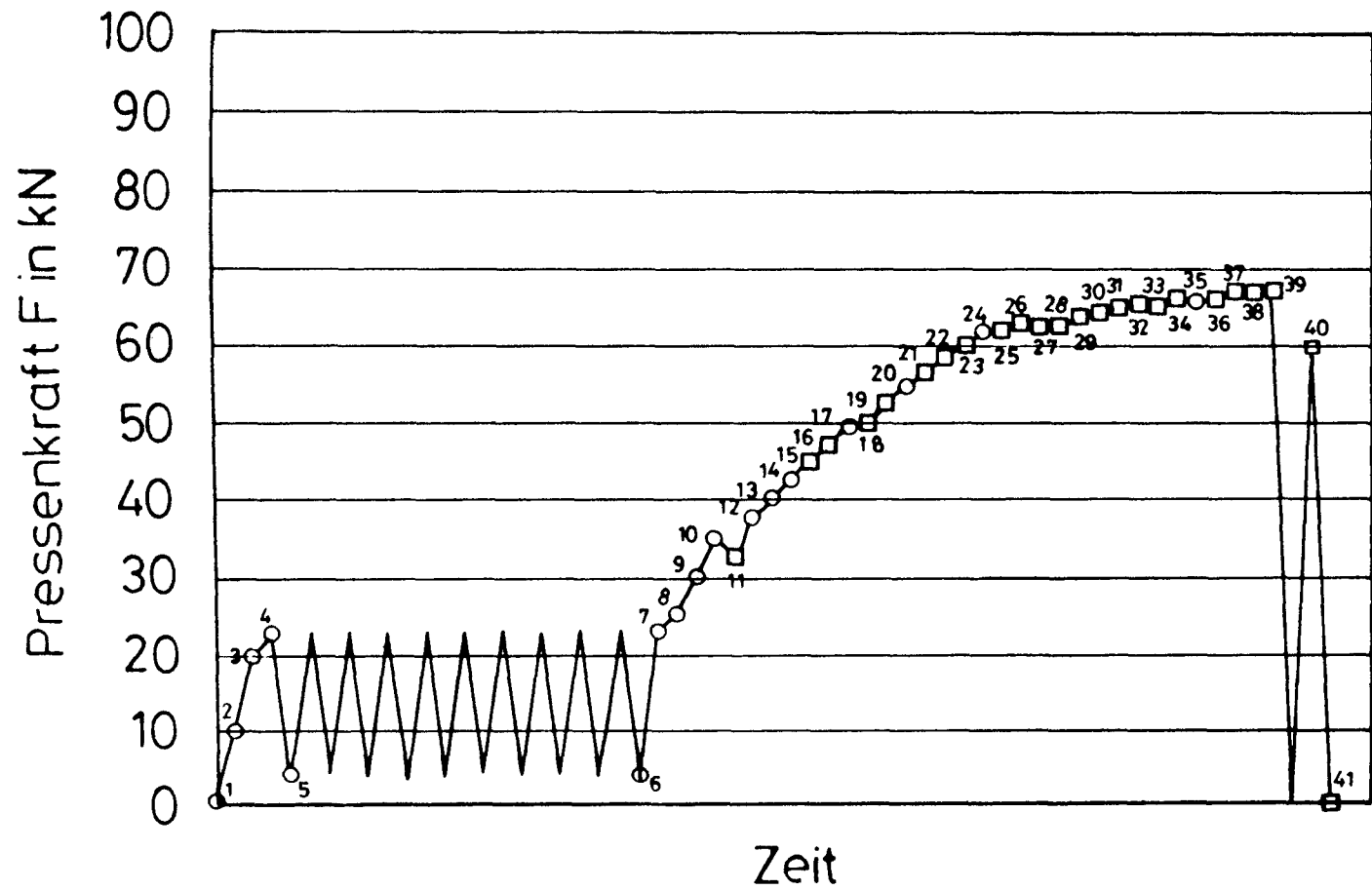


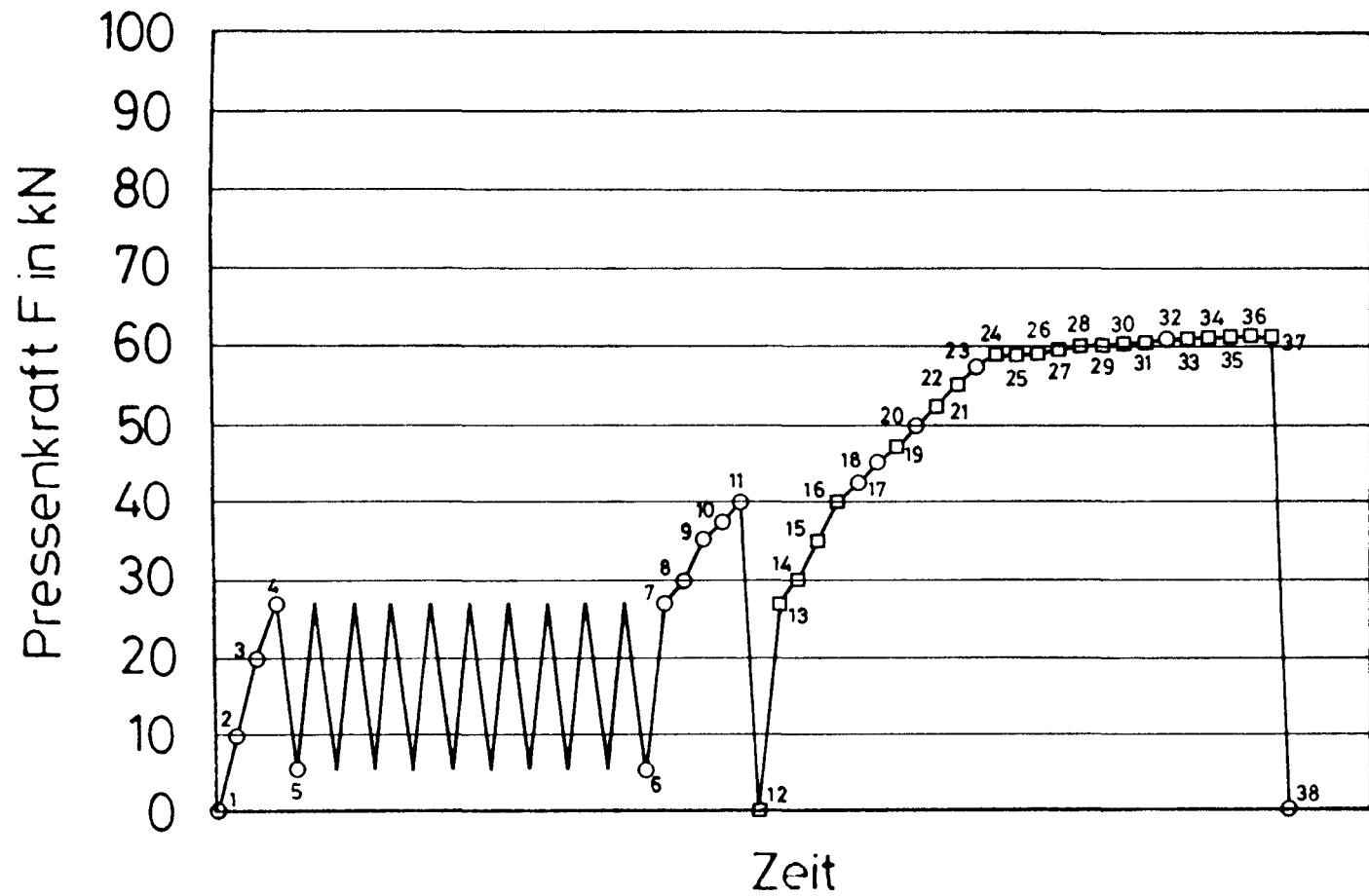
Bild 6.10 : Laststufenplan — Balken DB09, Lastfall1(LF1)



□ : Automatische Messung
○ : Komplette Messung

LS	F	LS	F
LS 1	0.0	LS 24	61.7
LS 2	10.0	LS 25	62.0
LS 3	20.0	LS 26	63.0
LS 4	23.0	LS 27	62.6
LS 5	4.0	LS 28	62.8
LS 6	4.0	LS 29	63.1
LS 7	23.0	LS 30	63.9
LS 8	25.0	LS 31	64.3
LS 9	30.0	LS 32	64.5
LS 10	35.0	LS 33	65.1
LS 11	32.5	LS 34	65.6
LS 12	37.5	LS 35	66.0
LS 13	40.0	LS 36	65.8
LS 14	42.5	LS 37	66.5
LS 15	45.0	LS 38	66.9
LS 16	47.5	LS 39	67.1
LS 17	49.3	LS 40	60.0
LS 18	50.8	LS 41	0.0
LS 19	52.6		
LS 20	54.6		
LS 21	56.5		
LS 22	58.6		
LS 23	60.2		

Bild 6.11 : Laststufenplan — Balken DB10, Lastfall 1 (LF1)



LS	F	LS	F
LS 1	0.0	LS 24	59.0
LS 2	10.0	LS 25	58.8
LS 3	20.0	LS 26	59.2
LS 4	26.4	LS 27	59.3
LS 5	5.0	LS 28	60.0
LS 6	5.0	LS 29	60.1
LS 7	26.4	LS 30	60.4
LS 8	30.0	LS 31	60.5
LS 9	35.0	LS 32	61.0
LS 10	37.5	LS 33	61.0
LS 11	40.0	LS 34	61.2
LS 12	0.0	LS 35	61.3
LS 13	26.4	LS 36	61.4
LS 14	30.0	LS 37	61.3
LS 15	35.0	LS 38	0.0
LS 16	40.0		
LS 17	42.5		
LS 18	45.0		
LS 19	47.5		
LS 20	50.0		
LS 21	52.5		
LS 22	55.0		
LS 23	57.5		

Bild 6.12 : Laststufenplan — Balken DB11, Lastfall 1(LF1)

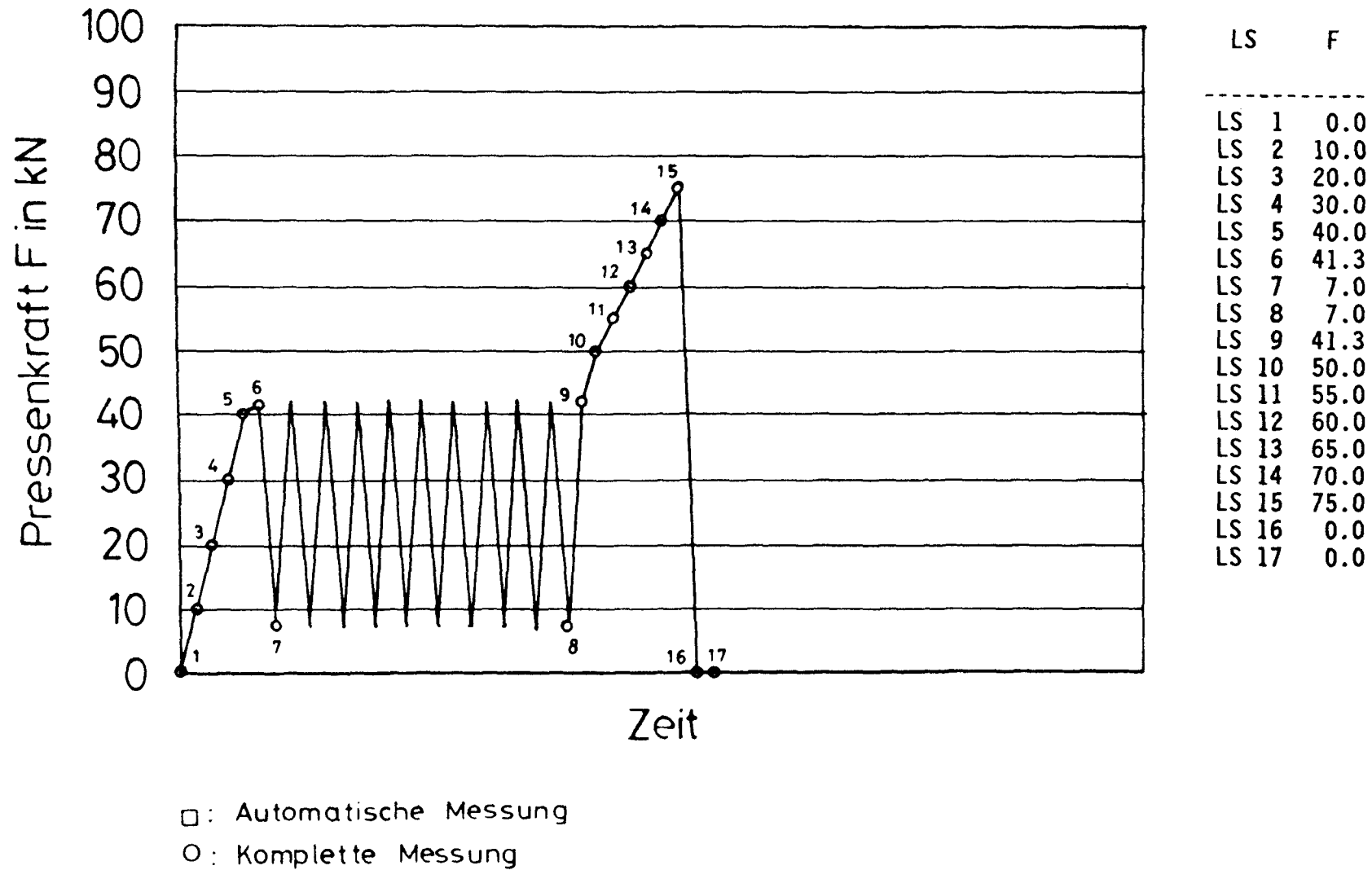
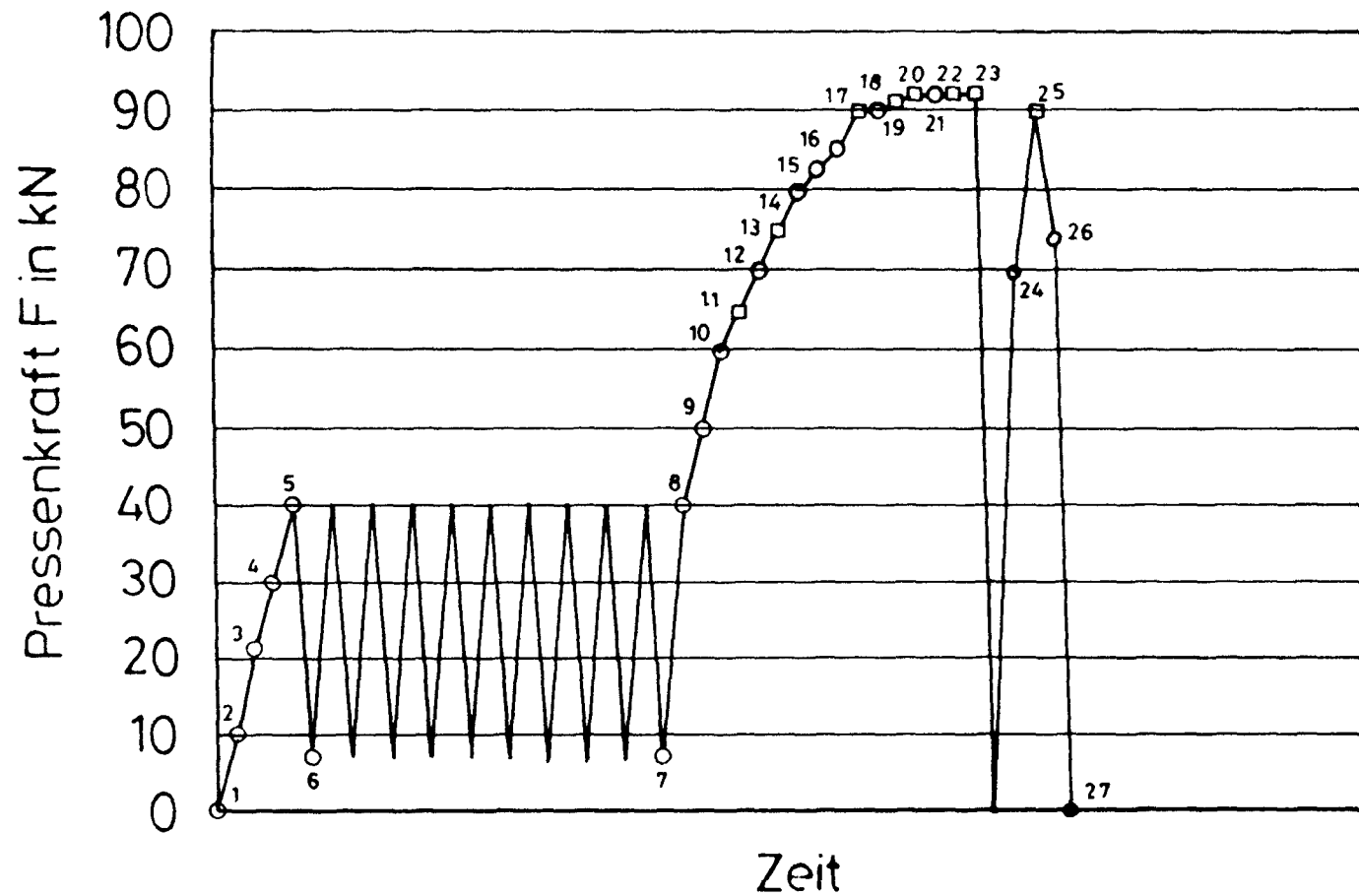
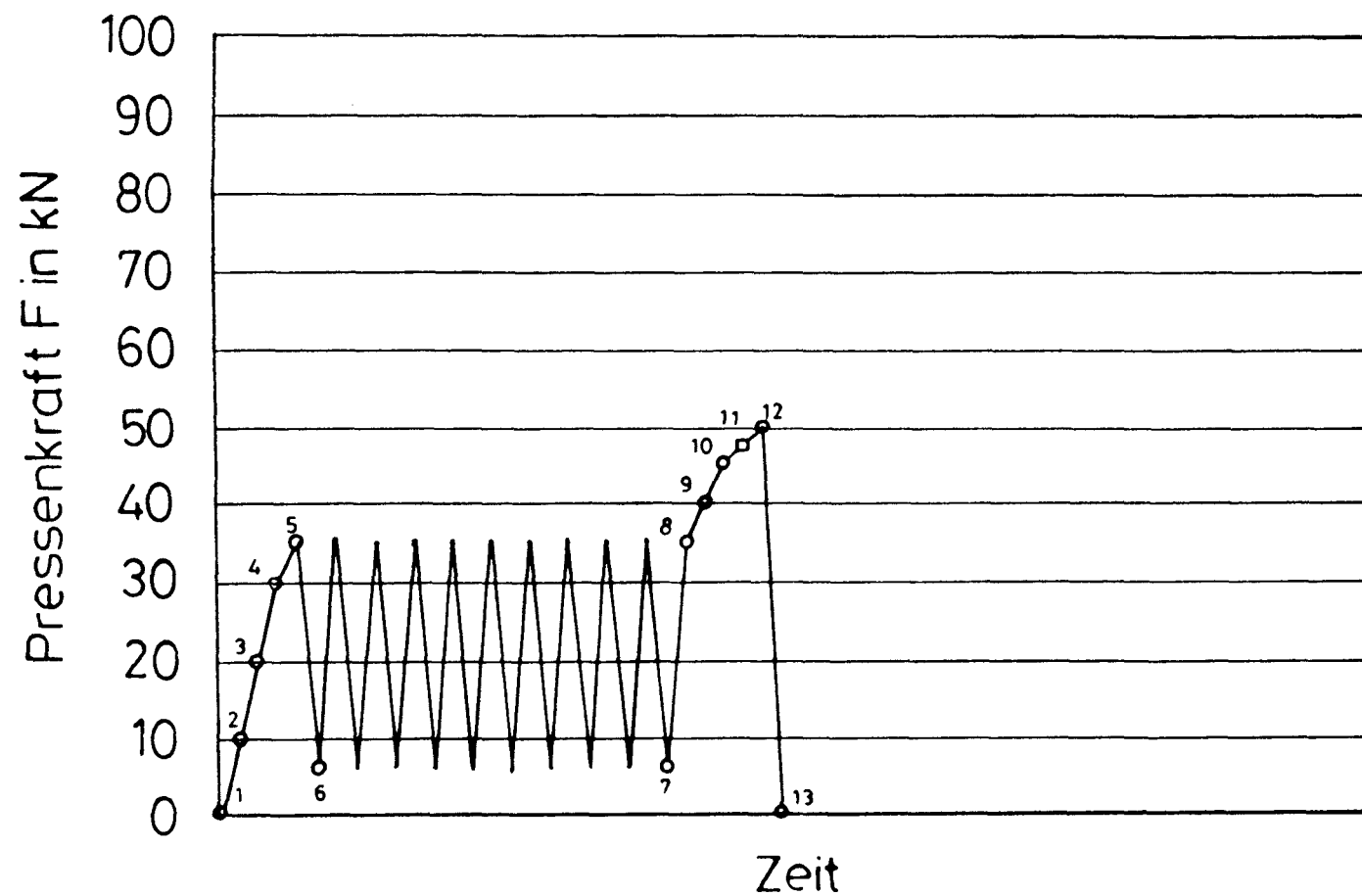


Bild 6.13 : Laststufenplan — Balken SB01, Lastfall I1(LF1)



LS	F	LS	F
LS 1	0.0	LS 24	70.0
LS 2	10.0	LS 25	90.0
LS 3	21.0	LS 26	74.0
LS 4	30.0	LS 27	0.0
LS 5	40.0		
LS 6	7.0		
LS 7	7.0		
LS 8	40.0		
LS 9	50.0		
LS 10	60.0		
LS 11	65.0		
LS 12	70.0		
LS 13	75.0		
LS 14	80.0		
LS 15	82.5		
LS 16	85.0		
LS 17	90.0		
LS 18	90.0		
LS 19	90.0		
LS 20	91.0		
LS 21	92.0		
LS 22	92.0		
LS 23	92.0		

Bild 6.14 : Laststufenplan — Balken SB02, Lastfall I1 (LF1)



LS	F
LS 1	0.0
LS 2	10.0
LS 3	20.0
LS 4	30.0
LS 5	35.0
LS 6	6.2
LS 7	6.2
LS 8	35.0
LS 9	40.0
LS 10	45.0
LS 11	47.5
LS 12	50.0
LS 13	0.0

□ : Automatische Messung
 ○ : Komplette Messung

Bild 6.15 : Laststufenplan — Balken SB03 ,Lastfall 1(LF1)

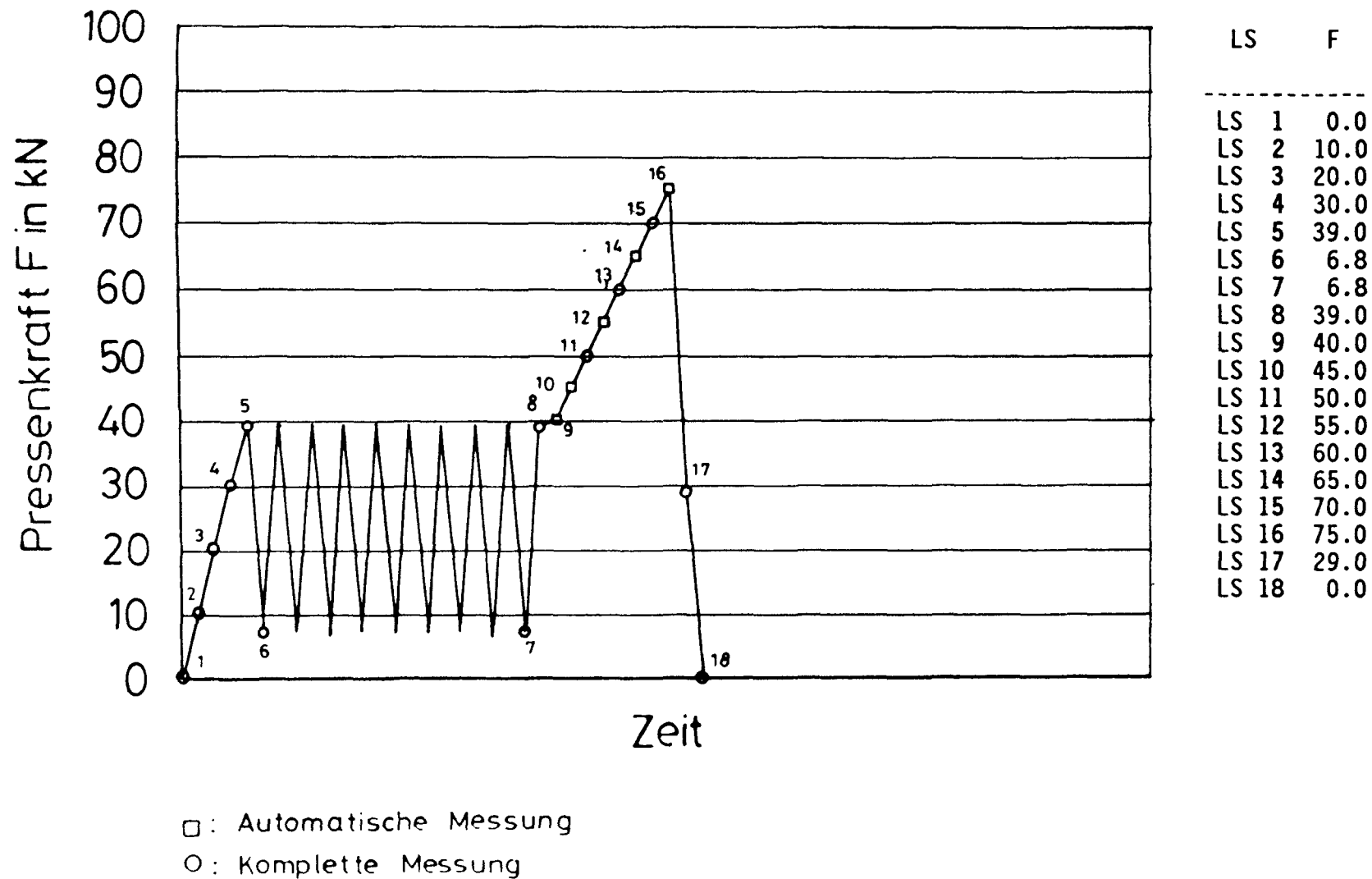
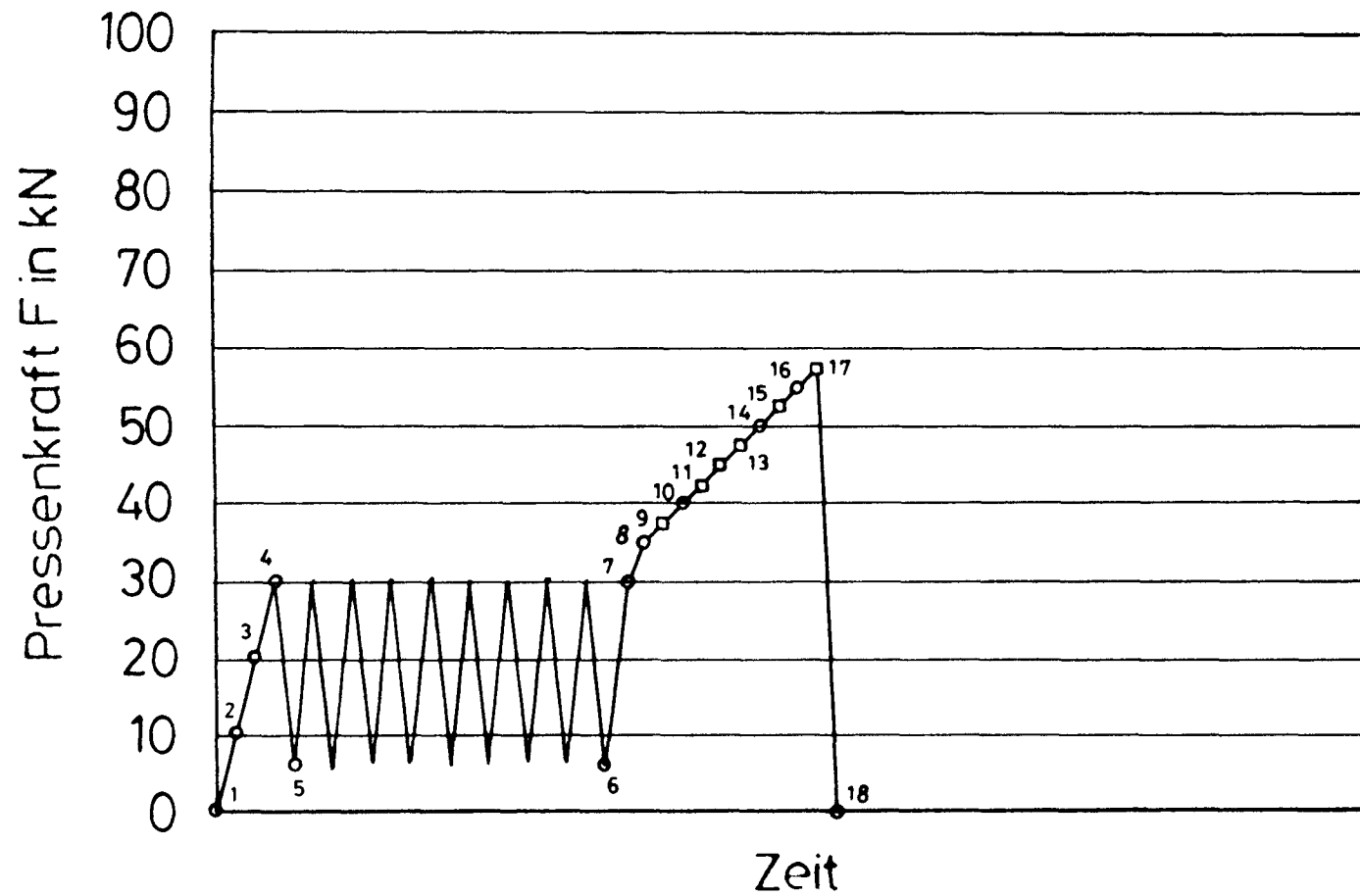


Bild 6.16 : Laststufenplan — Balken SB04, Lastfall 1(LF1)



LS	F	
LS 1	0.0	
LS 2	10.0	
LS 3	20.0	
LS 4	30.0	
LS 5	6.2	
LS 6	6.2	
LS 7	30.0	
LS 8	35.0	
LS 9	37.5	
LS 10	40.0	
LS 11	42.5	
LS 12	45.0	
LS 13	47.5	
LS 14	50.0	
LS 15	52.5	
LS 16	55.0	
LS 17	57.5	
LS 18	0.0	

□ : Automatische Messung
 ○ : Komplette Messung

Bild 6.17 : Laststufenplan — Balken SB05, Lastfall 1(LF1)

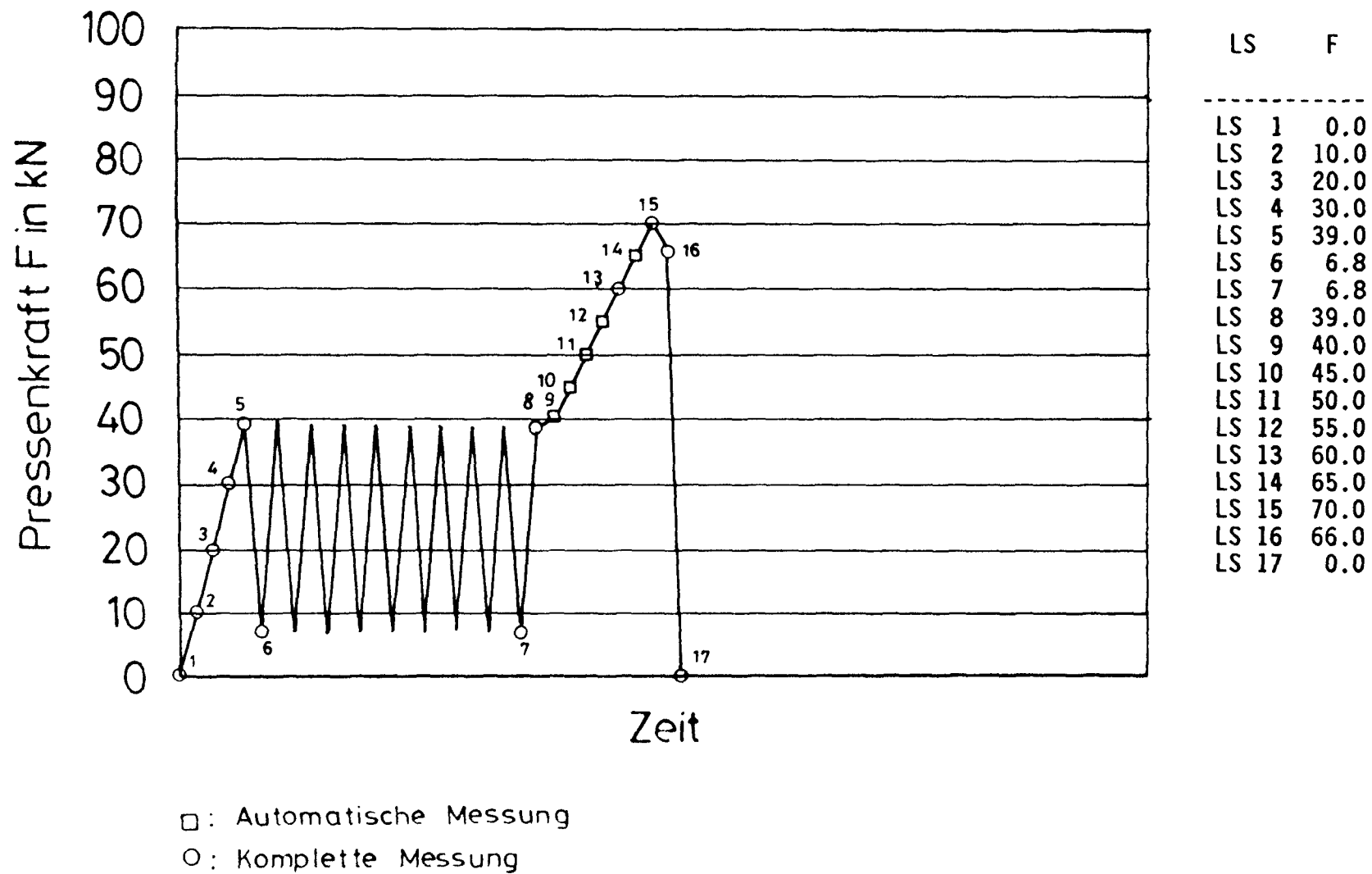
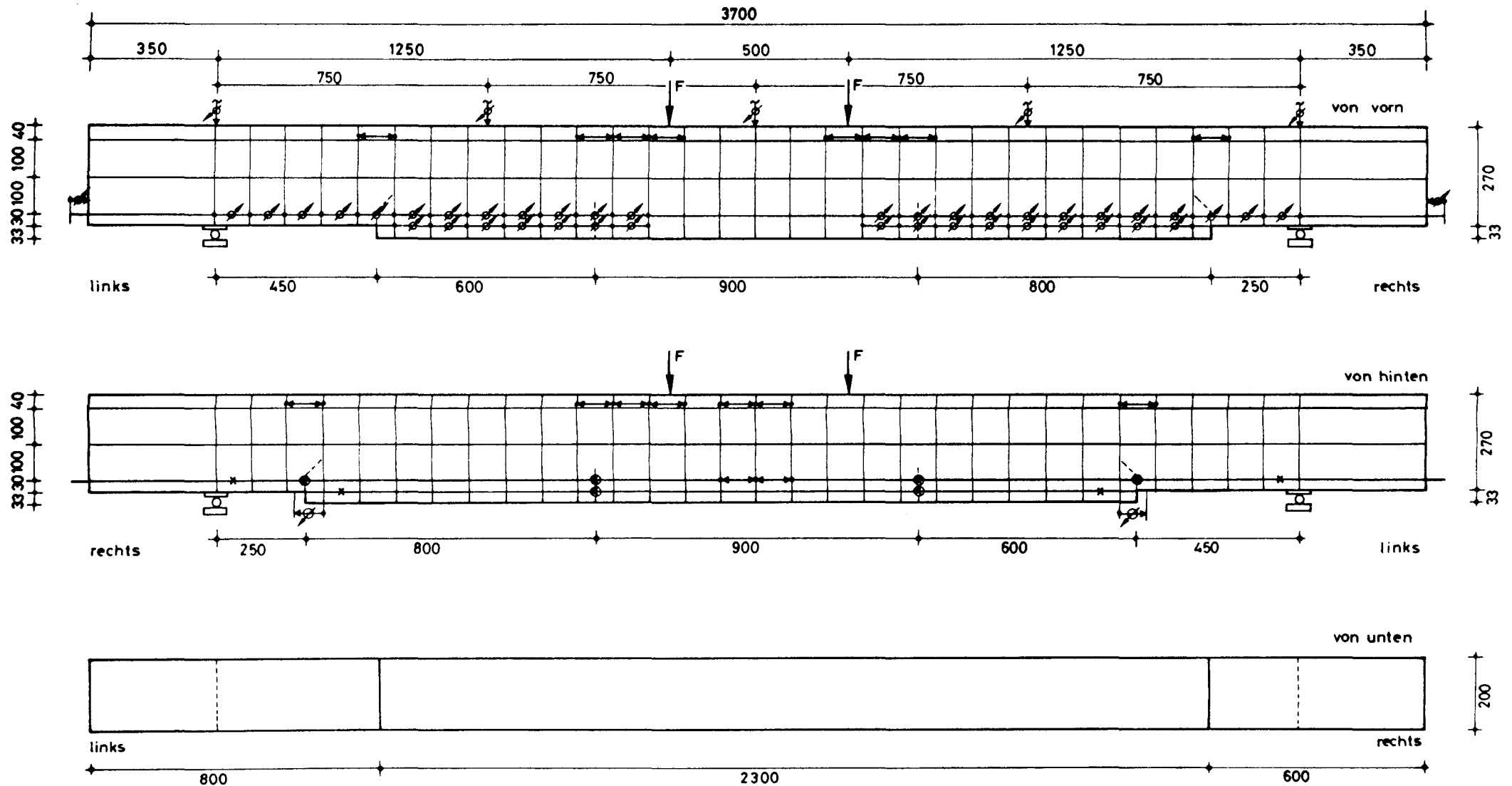


Bild 6.18 : Laststufenplan — Balken SB06, Lastfall I (LF1)



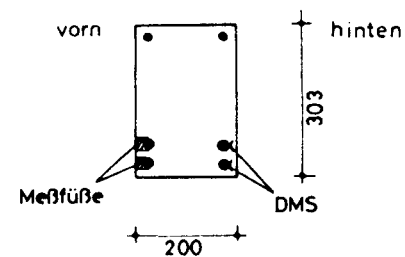
analoge Aufzeichnung auf
x,y - Schreiber :

S^I : bei Prüfung des Gesamtbalkens

S^II : bei Prüfung der rechten
Balkenhälfte

Rißfortschritt, Rißbreiten, Rißabstand

- ↗ : Meßuhr
- , ↘ : ind. Wegaufnehmer
- ↔ : SDM
- , × : DMS



Beton : B 35

Betonstahl : Bst 500 S

Bild 7.1 : Meßstellenplan - Balken DB01

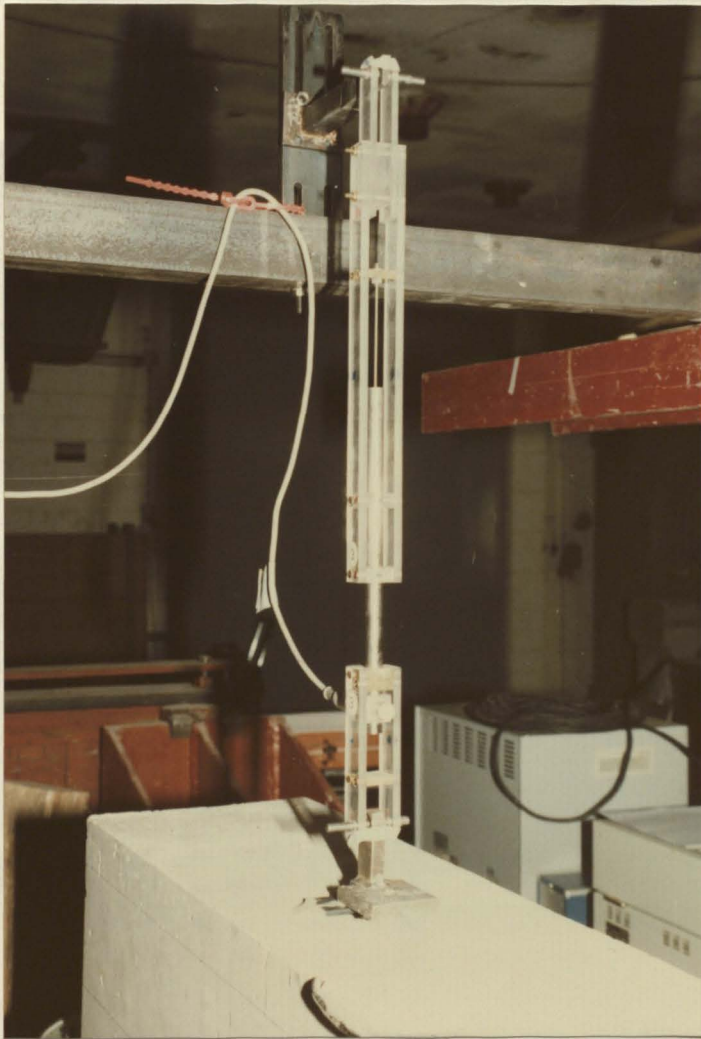


Bild 7.4 : Durchbiegungsmeßeinrichtung



Bild 7.5 : Messung des Endverankerungsschlupfs der Längsbewehrung



Bild 7.6 : Stahlsockel auf der Längsbewehrung

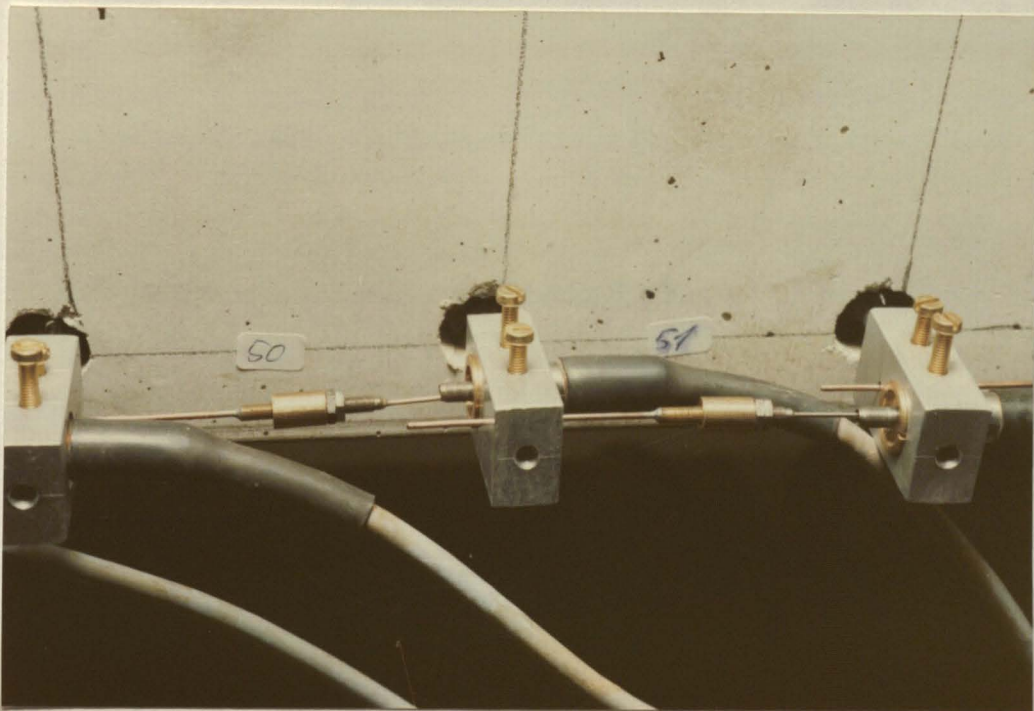


Bild 7.7 : Meßeinrichtung zur Messung der mittleren Betonstahldehnung

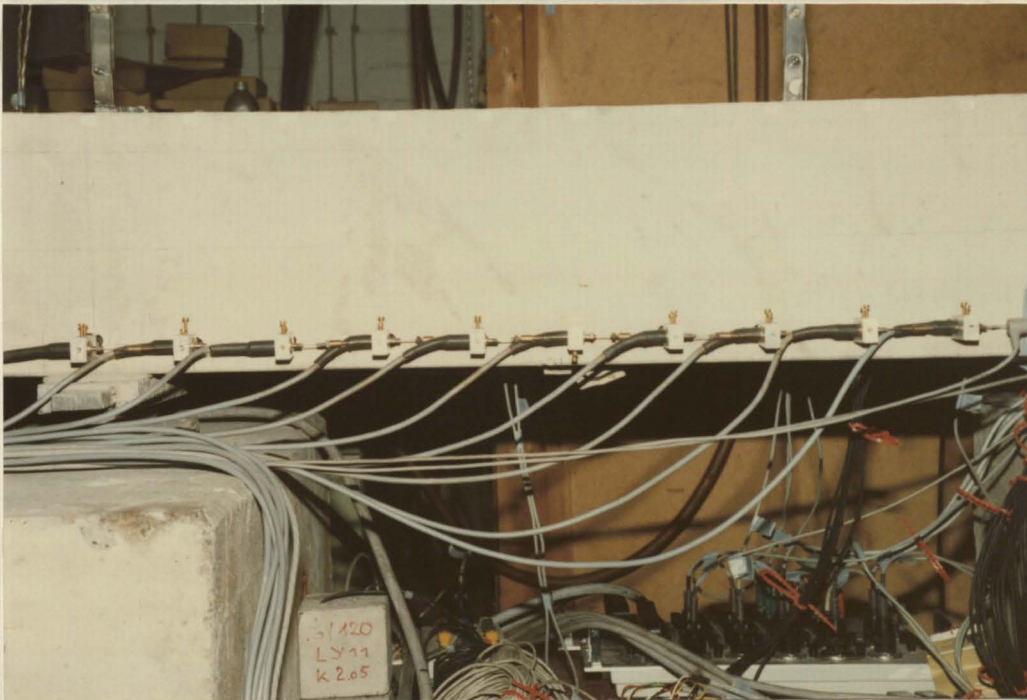


Bild 7.8 : Meßkette zur Messung der mittleren Betonstahldehnung

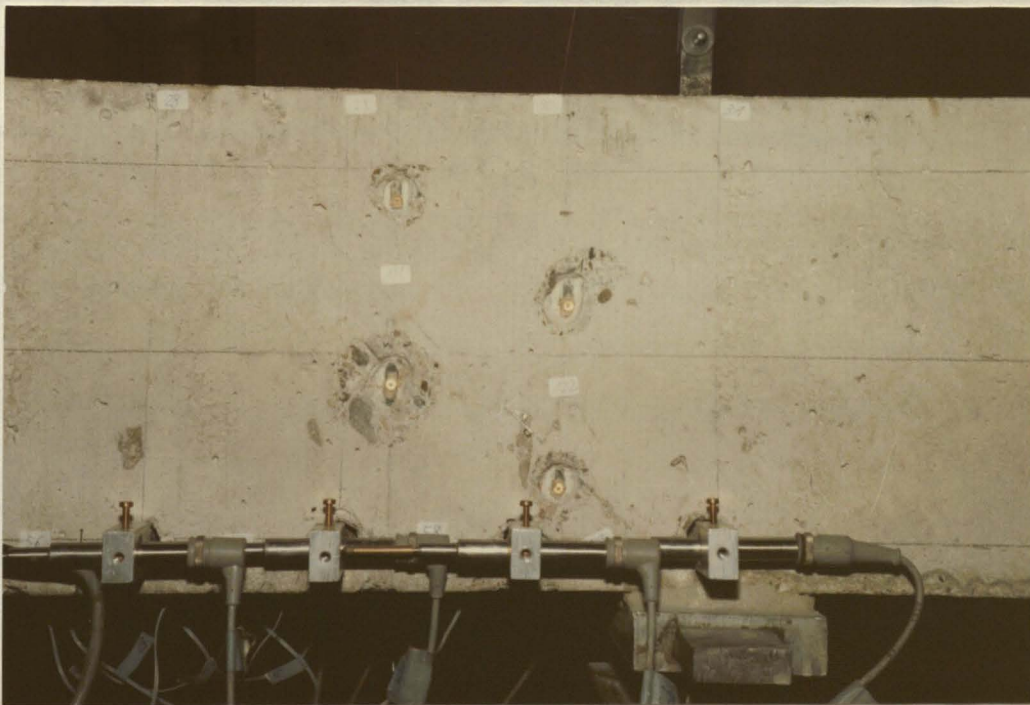


Bild 7.9 : SDM-Meßstellen zur Messung der mittleren Bügeldehnung im Bereich des Laschenendes

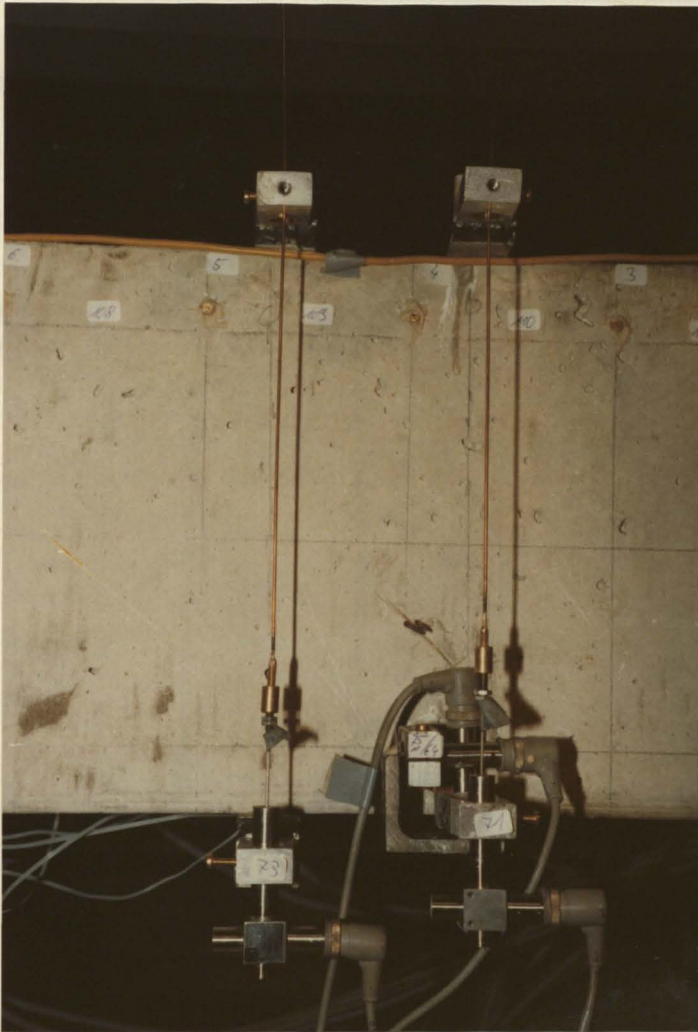


Bild 7.10 : Meßeinrichtung zur Messung der Balkenhöhe im Bereich des Laschenendes

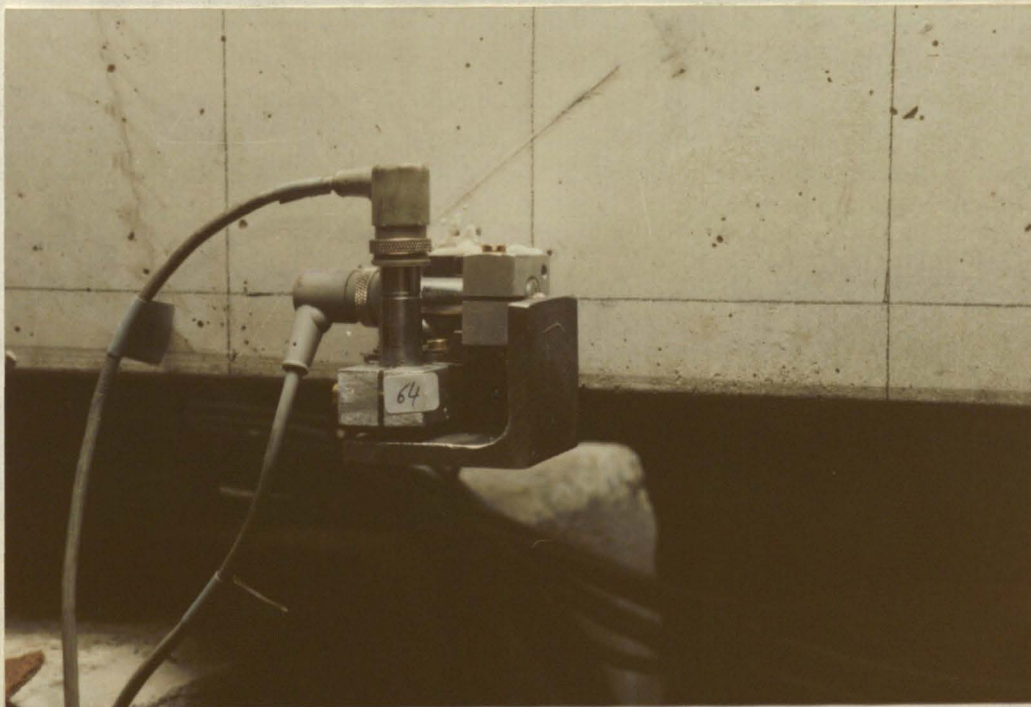


Bild 7.11 : Meßeinrichtung zur Messung der horizontalen und vertikalen Relativverschiebung zwischen Innenbewehrung und Lasche am Laschenende

Tabelle 8.1 : Gegenüberstellung von rechnerischen Bruchlasten und Versuchsbruchlast

Versuchskörper	Lastfall 1						
	Biegung	Verbund	Querkraft		F_{uVers}	Bruchart	Bemerkungen
	$F_{uV5\%}$	F_{uV}	F_u DIN	F_u RAFLA			
-	kN	kN	kN	kN	kN	-	-
DB01	79,5	-	64,2	72,8	62,5	SB	-
DB02	58,6	24,9	64,2	72,0	45,0	VB	Querdruck
DB04	84,7	37,5	64,2	73,8	62,7	SB	-
DB06	64,8	29,4	64,2	70,4	69,0	SBF	Querdruck
DB08	75,5	31,0	64,2	72,0	57,5	SB	-
DB09	52,7	18,9	64,2	72,0	32,5	AB	Querdruck
DB10	58,4	32,0	64,2	70,4	67,1	SBF	Querdruck
DB11	52,8	25,7	64,2	72,8	61,3	BB	Querdruck
SB01	87,4	42,0	194,8	172,0	75	VB	-
SB02	84,5	58,2	194,8	164,4	90	ZB	-
SB03	75,4	32,1	194,8	164,4	50(45)	VB	-
SB04	81,5	46,1	194,8	170,4	75(50)	VB	-
SB05	100,1	32,5	194,4	182,6	57,5(40)	VB	-
SB06	107,2	47,8	194,4	179,2	70(45)	VB	-

() : begrenzter Verbundbruch im Bereich des Laschenendes

SB : Schrägzugbruch

SBF : Schrägzugbruch nach Fließen von Bewehrung und Lasche

VB : Verbundbruch durch Kohäsionsbruch im Beton

AB : Adhäsionsbruch zwischen Klebschicht und Lasche

BB : Bruch durch Versagen der Biegedruckzone

ZB : horizontaler Riß im Beton in Höhe der Innenbewehrung im Bereich des Laschenendes

Tabelle 8.2 : Gegenüberstellung von rechnerischen Bruchlasten und Versuchsbruchlast

Versuchskörper	Lastfall 2						
	Biegung	Verbund	Querkraft		F_{uVers}	Bruchart	Bemerkungen
	$F_{uV5\%}$	F_{uV}	F_{uDIN}	F_{uRAFLA}			
-	kN	kN	kN	kN	kN	-	-
DB01	145,8	-	119,1	134,1	-	-	-
DB02	109,2	62,7	119,1	132,7	117	VB	Querdruck
DB04	154,8	83,3	119,1	135,9	129	SB	-
DB06	120,1	58,2	119,1	129,9	-	-	-
DB08	138,8	64,1	119,1	132,7	123	VB	Querdruck
DB09	98,8	47,8	119,1	132,7	107	VB	Querdruck
DB10	108,9	kein VB	119,1	129,9	-	-	-
DB11	99,1	kein VB	119,1	134,1	-	-	-
SB01	159,6	89,4	347,6	307,7	-	-	-
SB02	154,5	kein VB	347,6	294,4	177	BB	*
SB03	138,6	69,8	347,6	294,4	154	BB	*
SB04	149,2	97,7	347,6	304,9	174,5	BB	*
SB05	95,9	40,0	183,9	172,9	73,5	VB	-
SB06	102,6	55,6	183,9	169,7	103	VB	-

* Verbundversagen links vom Lasteintragungspunkt führte trotz angebrachter Schraubzwingen zum Durchrutschen der linken Laschenseite

SB : Schrägzugbruch

VB : Verbundbruch durch Kohäsionsbruch im Beton

BB : Bruch durch Versagen der Biegedruckzone

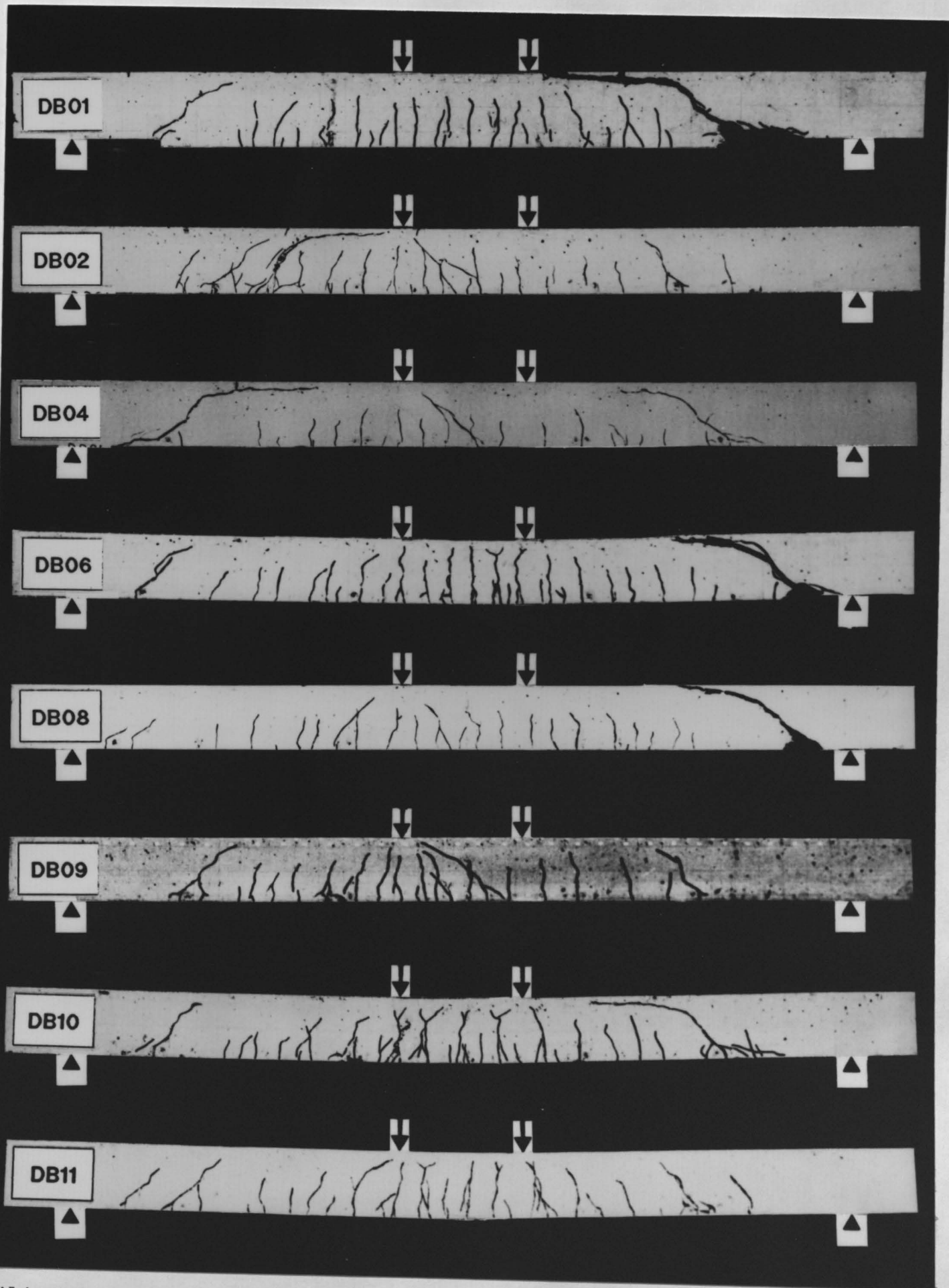


Bild 8.1 : Rißbilder der DB-Balken nach Abschluß der Versuche

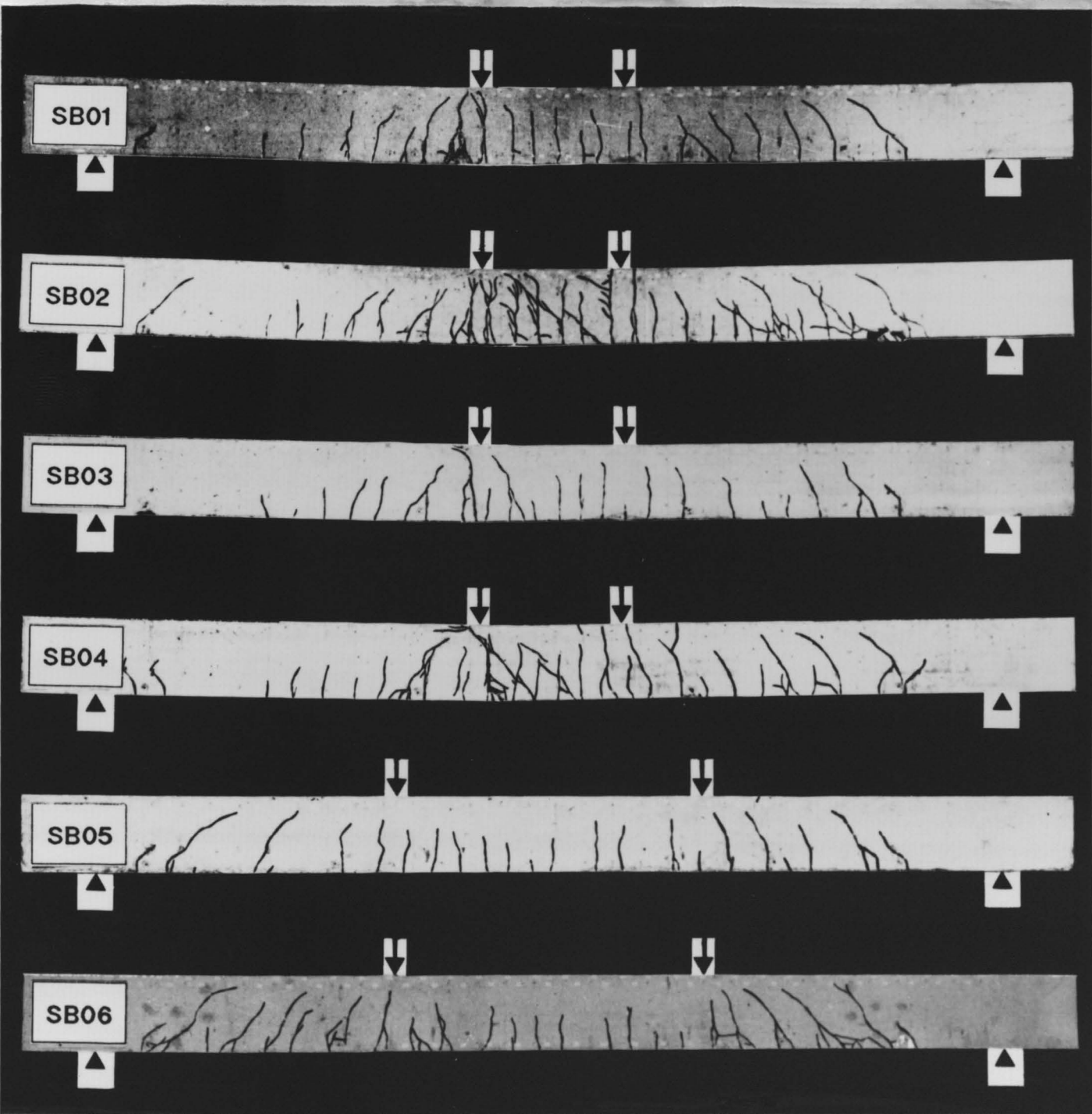


Bild 8.2 : Rißbilder der SB-Balken nach Abschluß der Versuche

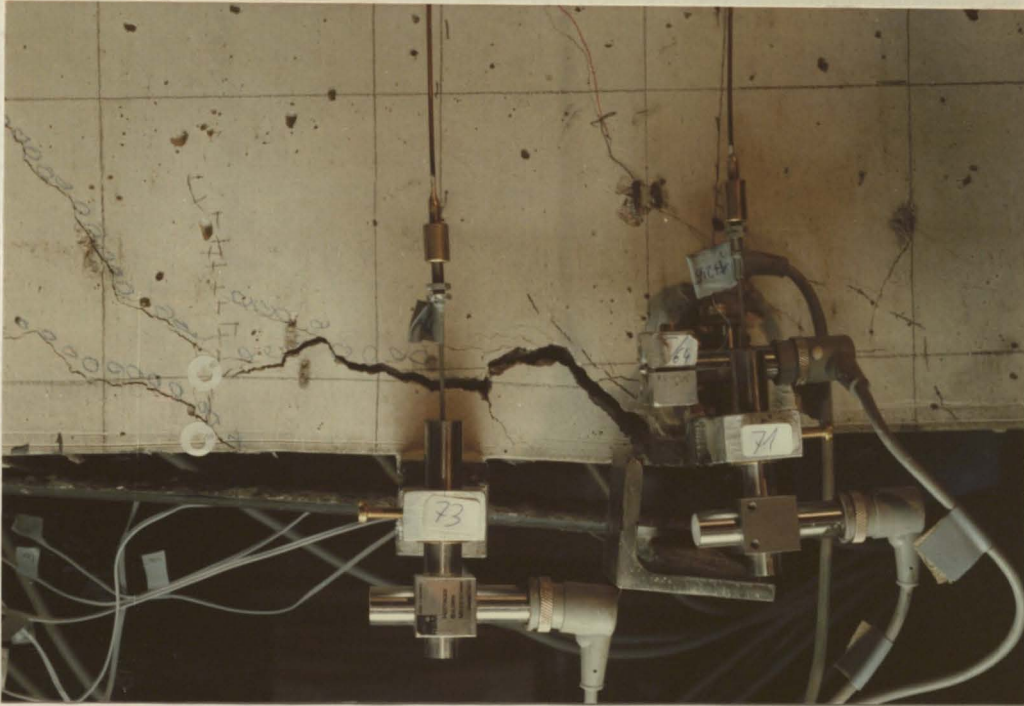


Bild 8.3 : Bruch durch Bildung eines horizontalen Risses am Laschenende in Höhe der Innenbewehrung mit anschließendem Verbundbruch
- Balken SB02, LF1, vorn

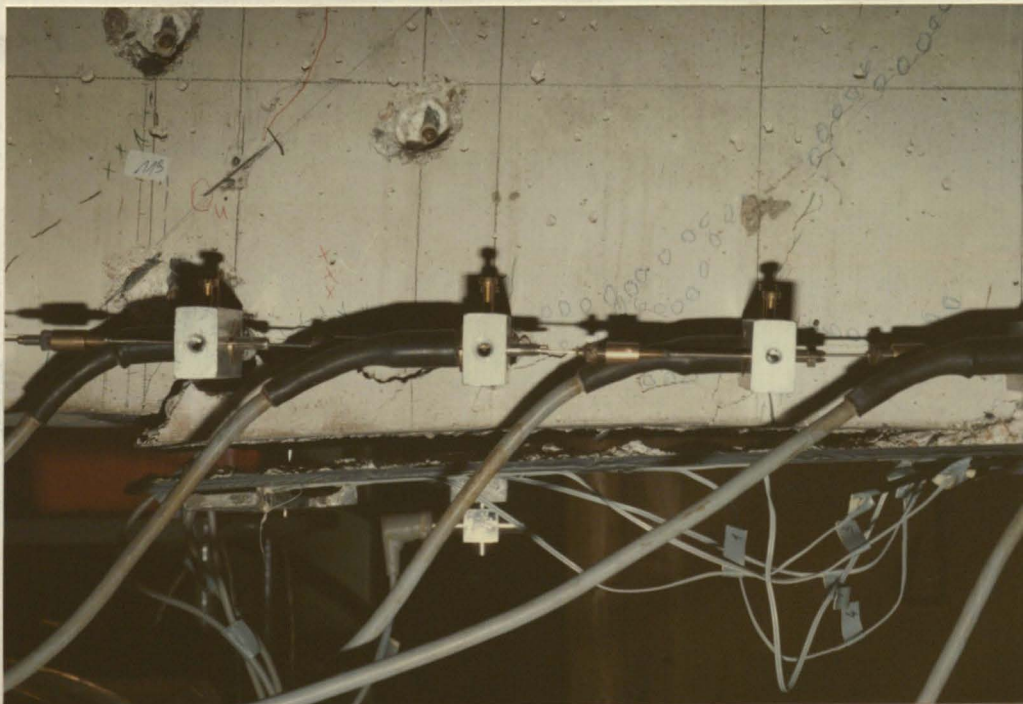


Bild 8.4 : Bruch durch Bildung eines horizontalen Risses am Laschenende in Höhe der Innenbewehrung mit anschließendem Verbundbruch
Balken SB02, LF1, hinten

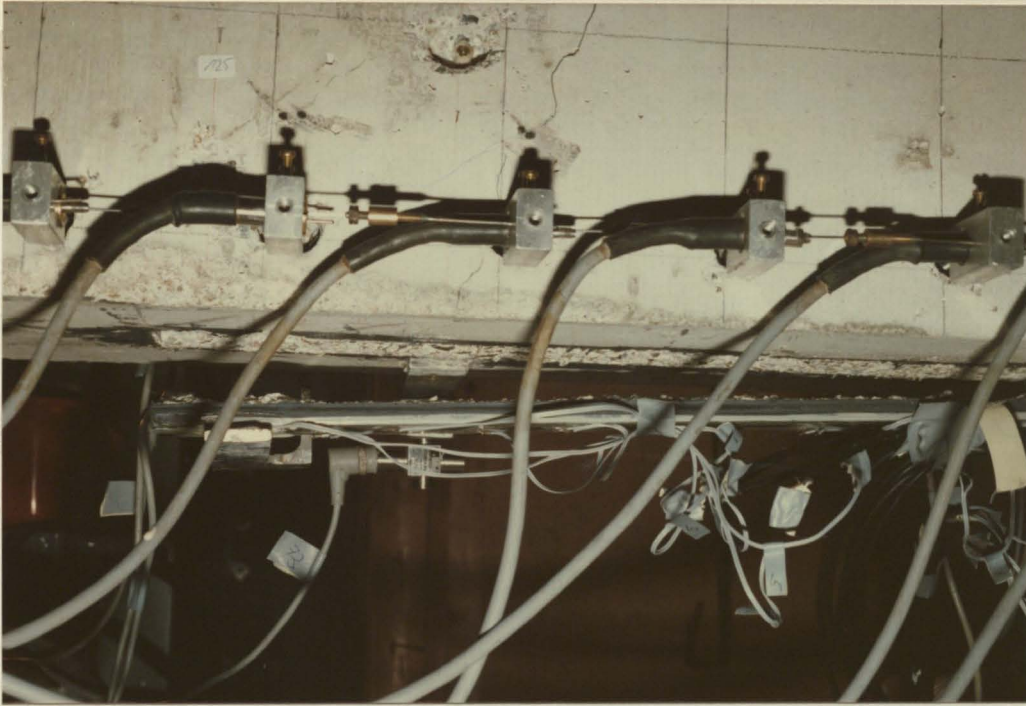


Bild 8.5 : Verbundbruch - Balken SB05, LF1

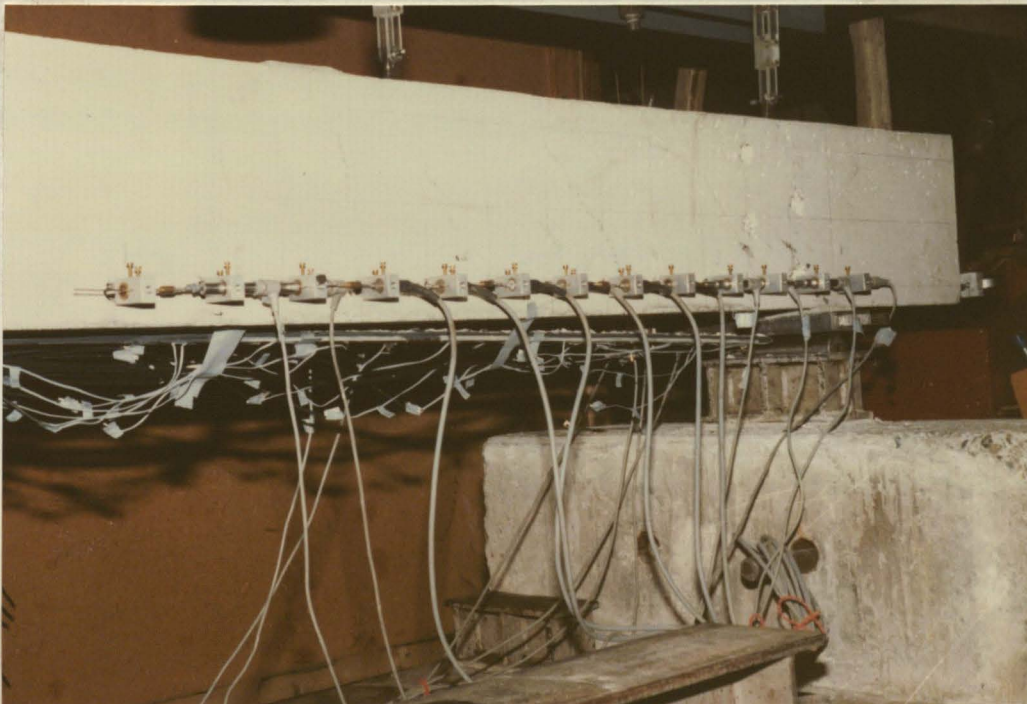


Bild 8.6 : Verbundbruch - Balken SB05, LF2

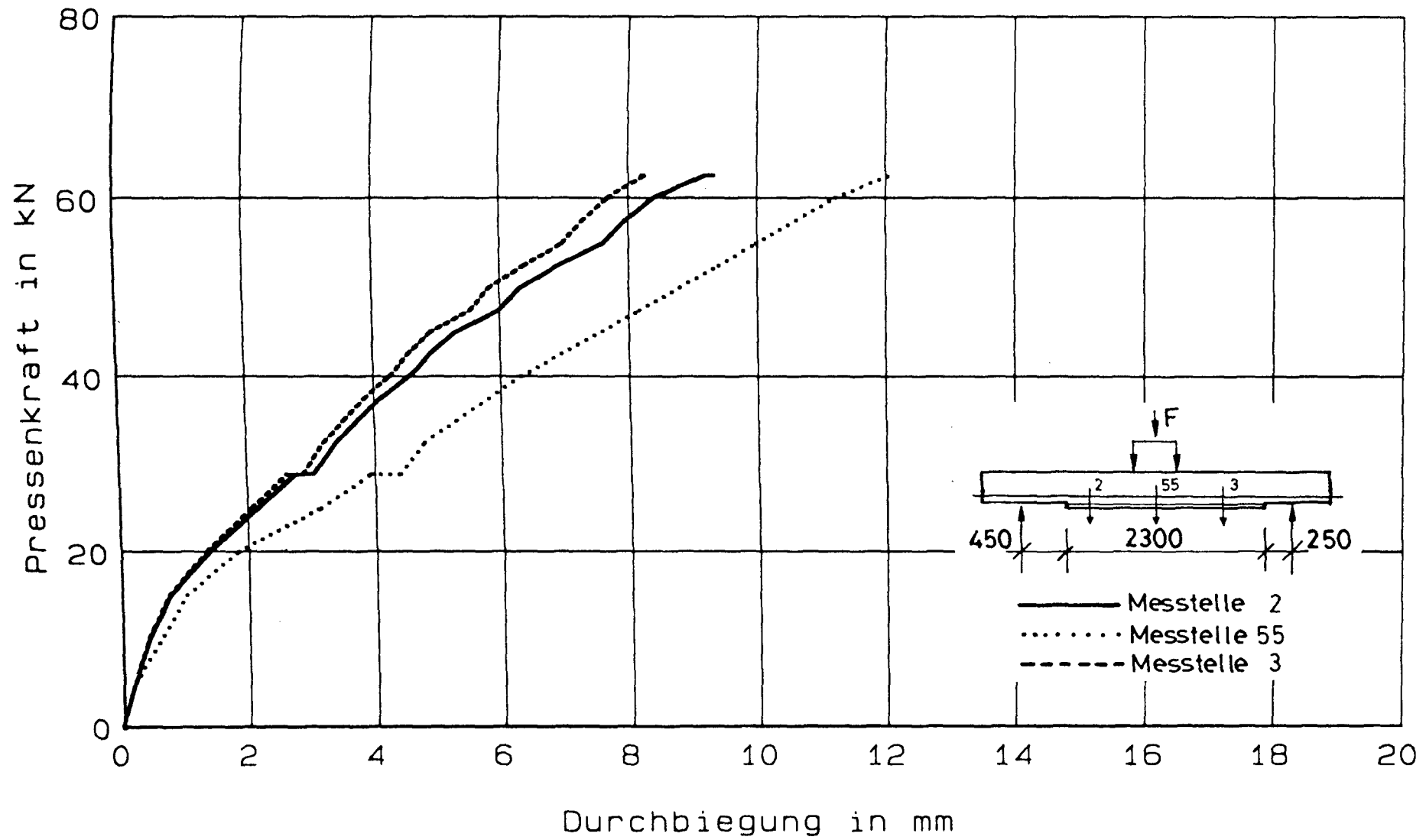


Bild 8.7 : Durchbiegung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB01, LF1

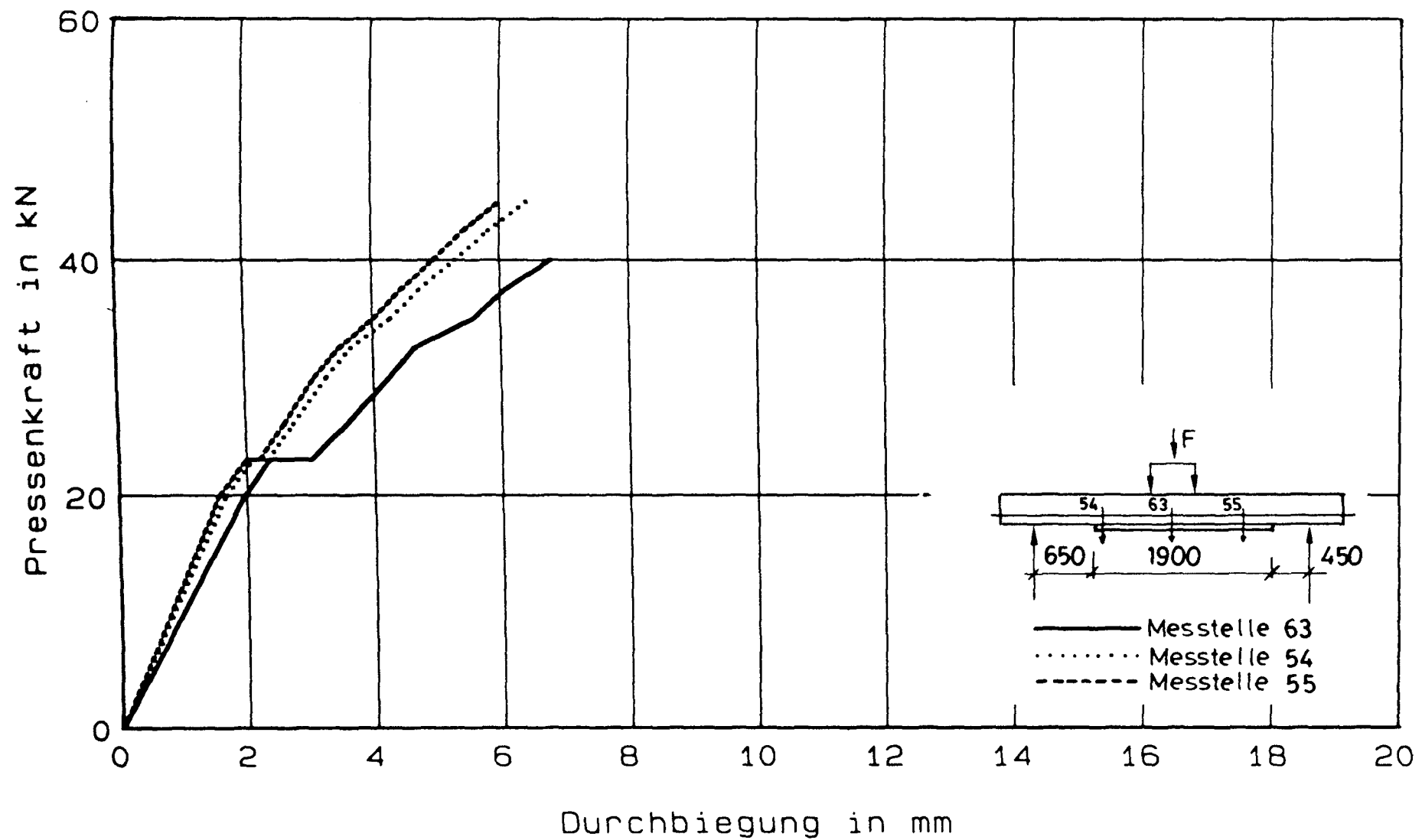


Bild 8.8 : Durchbiegung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB02, LF1

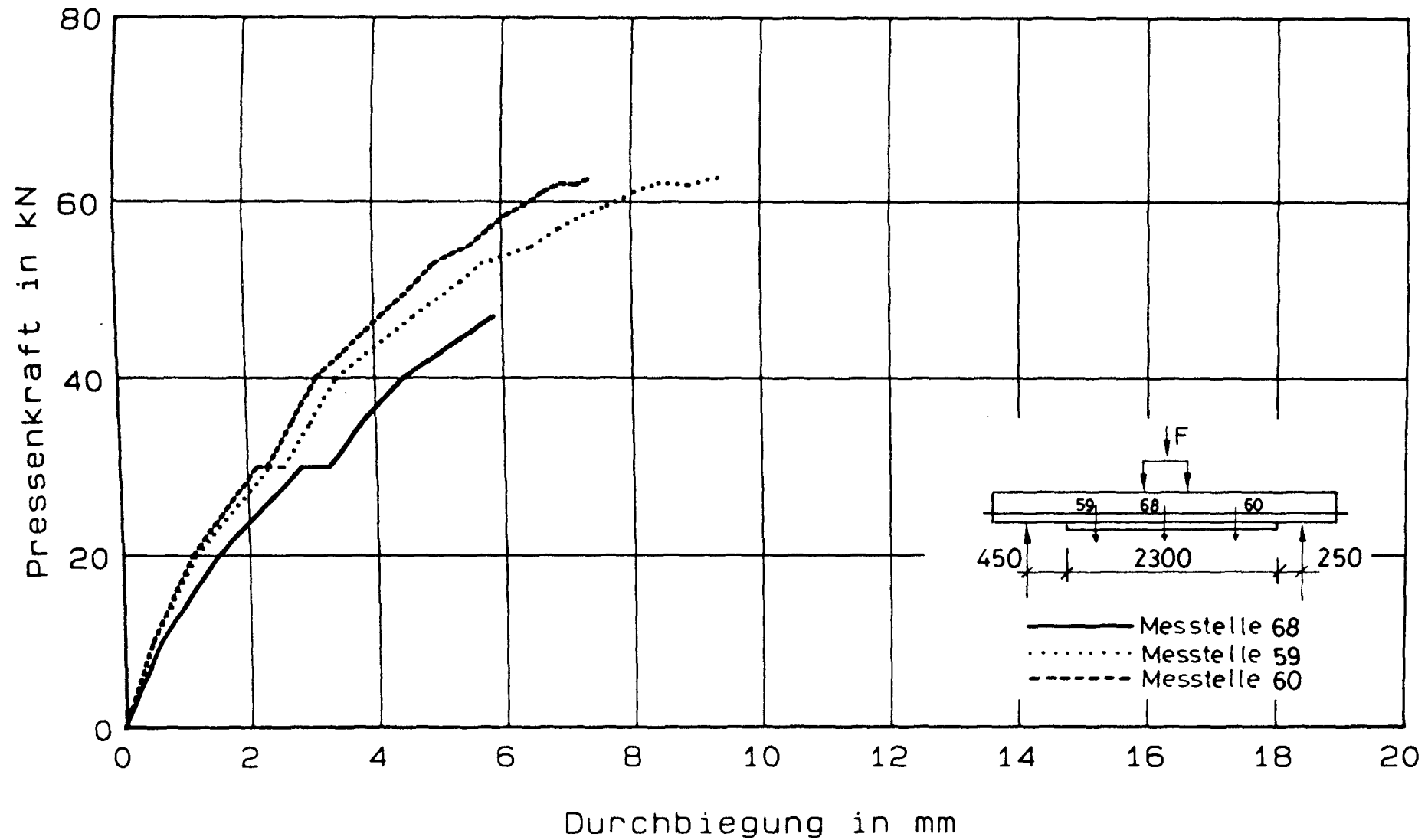


Bild 8.9 : Durchbiegung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB04, LF1

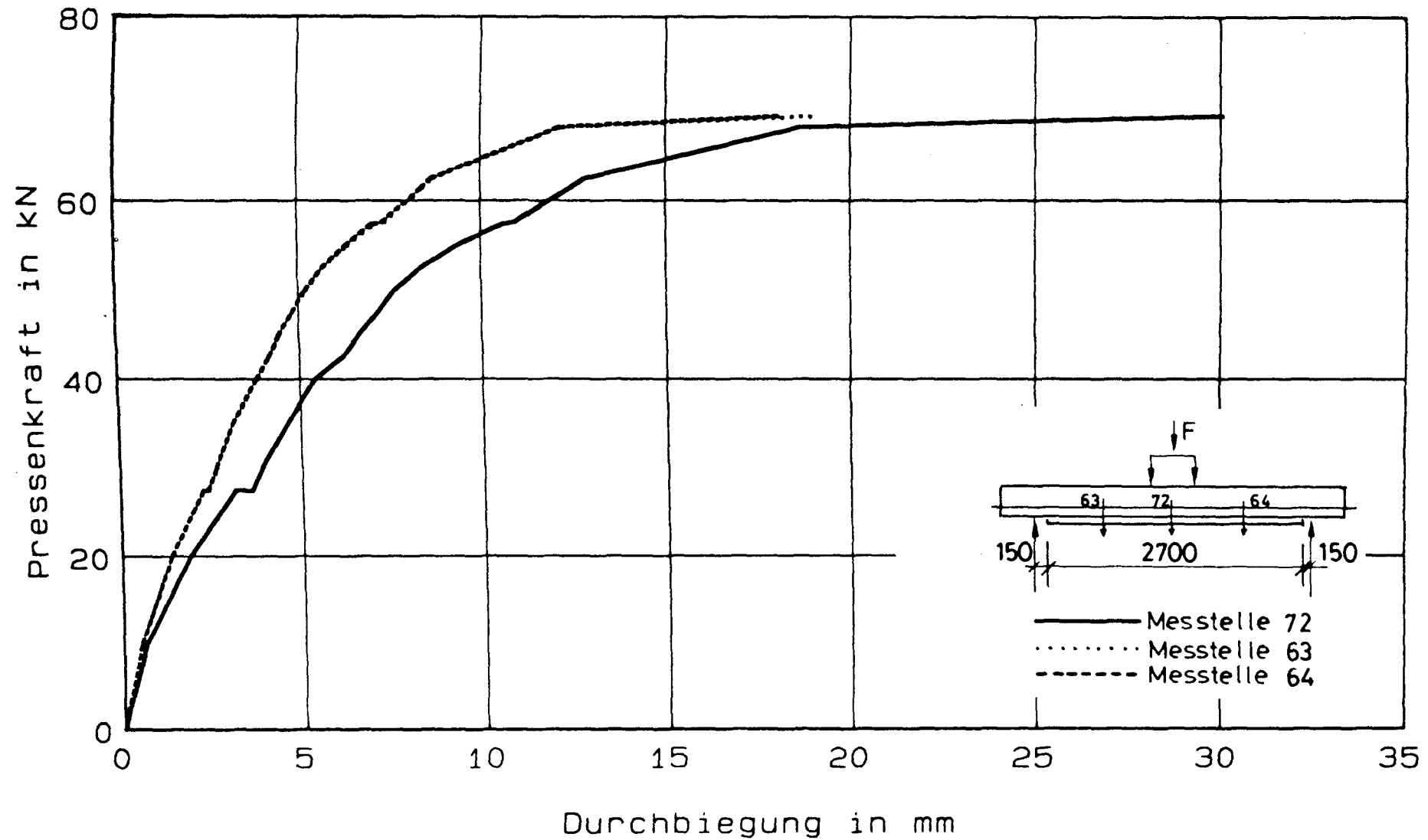


Bild 8.10 : Durchbiegung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB06, LF1

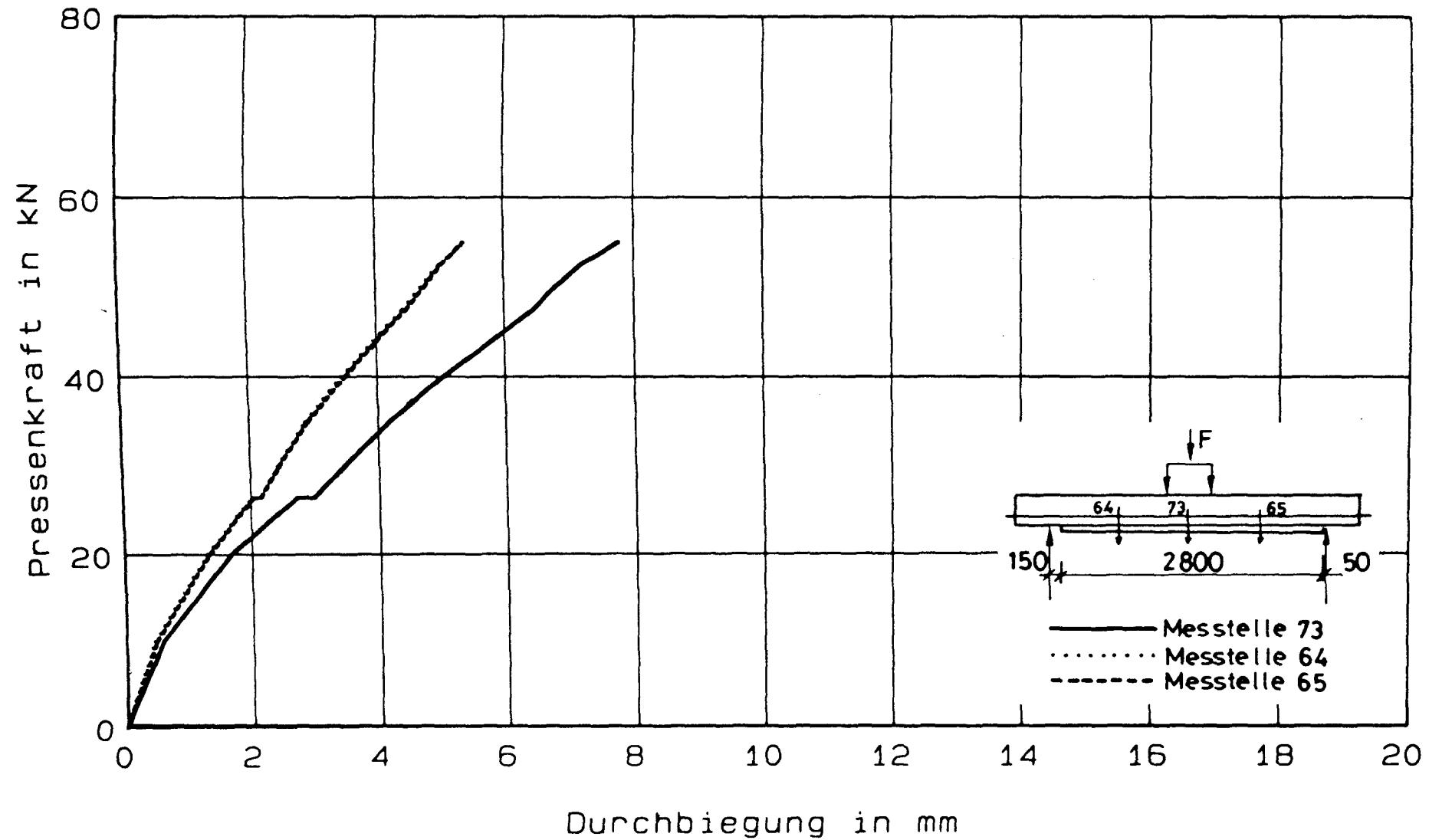


Bild 8.11 : Durchbiegung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB08, LF1

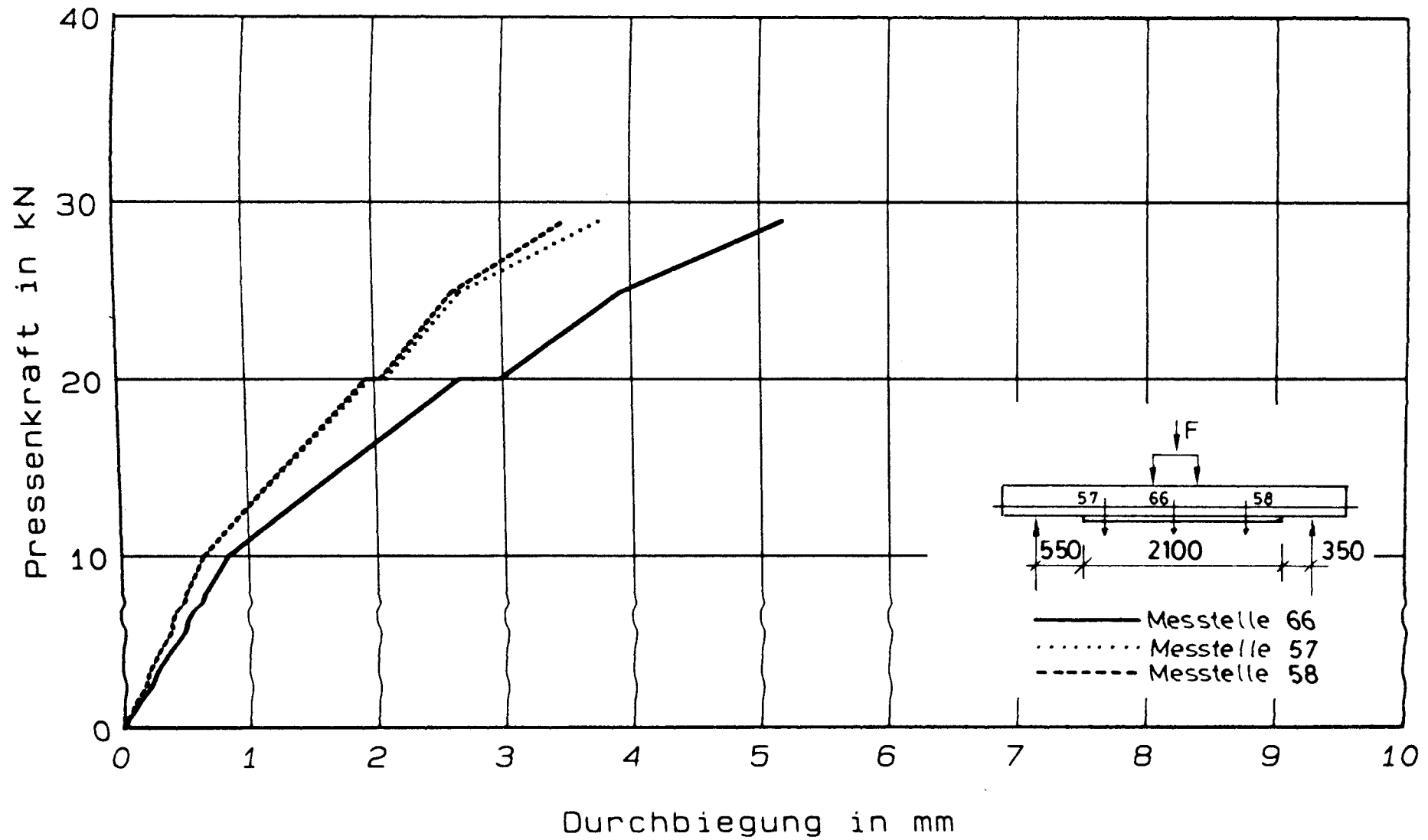


Bild 8.12 : Durchbiegung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB09, LF1

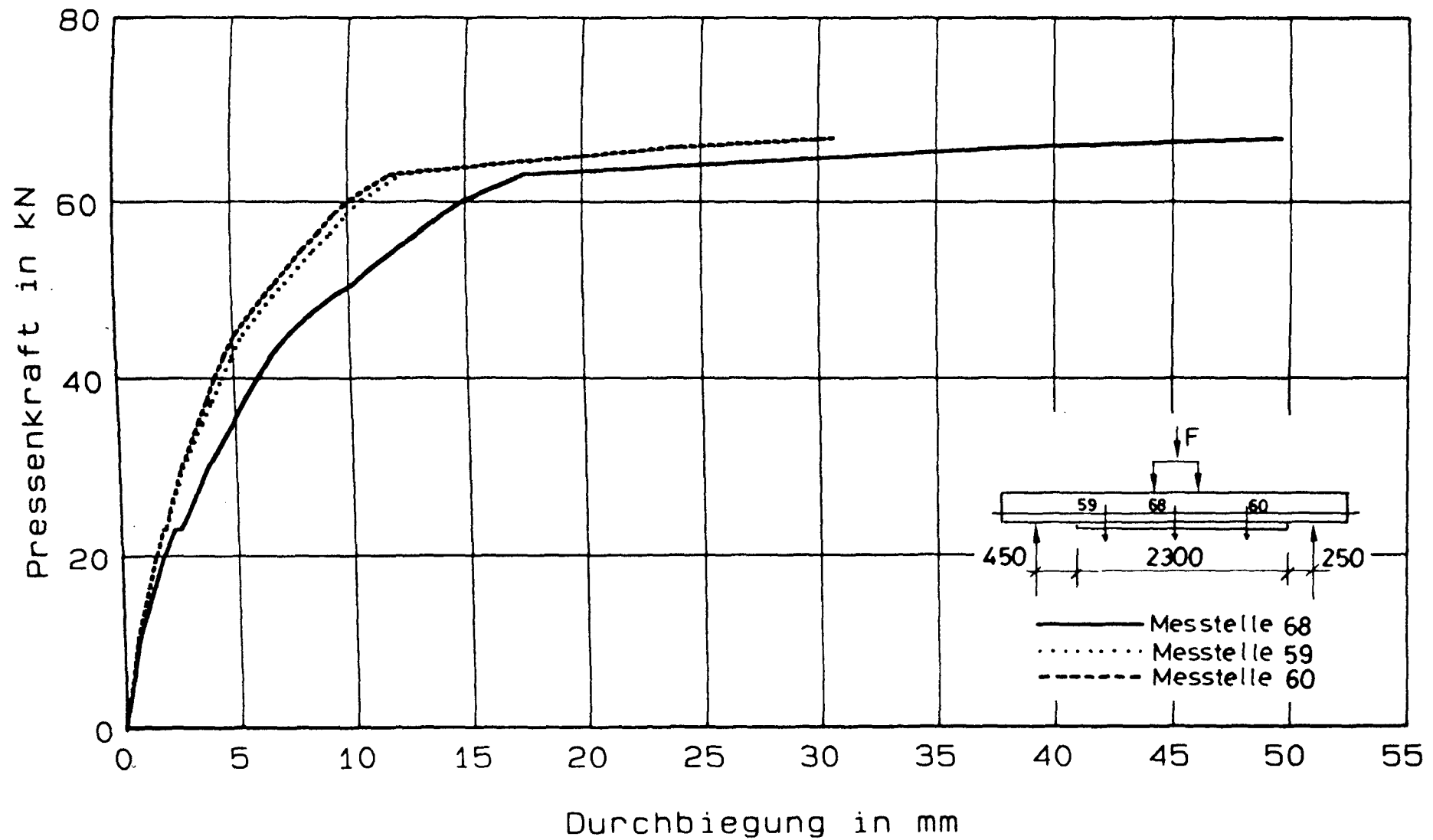


Bild 8.13 : Durchbiegung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB10, LF1

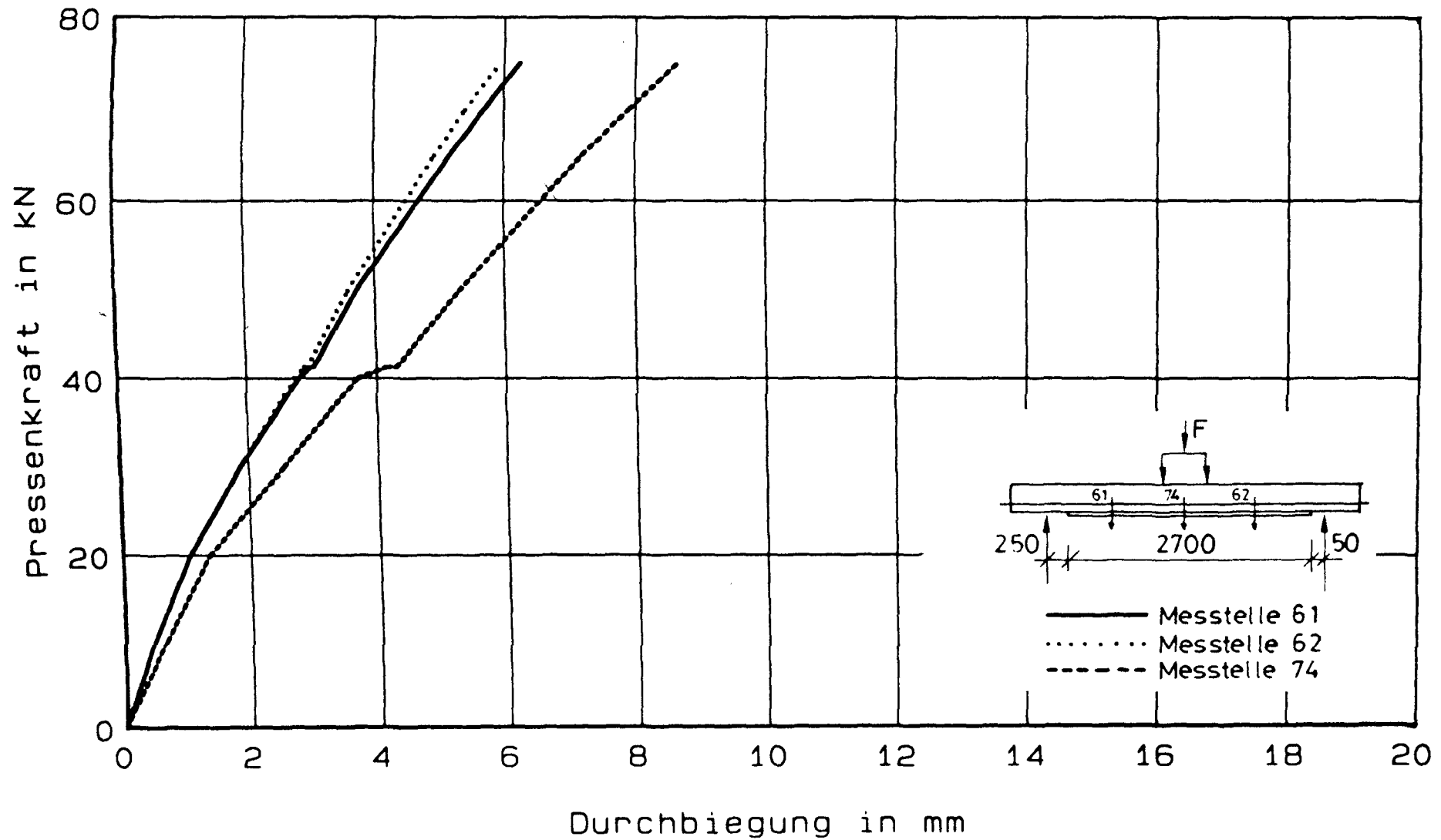


Bild 8.14 : Durchbiegung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB01, LF1

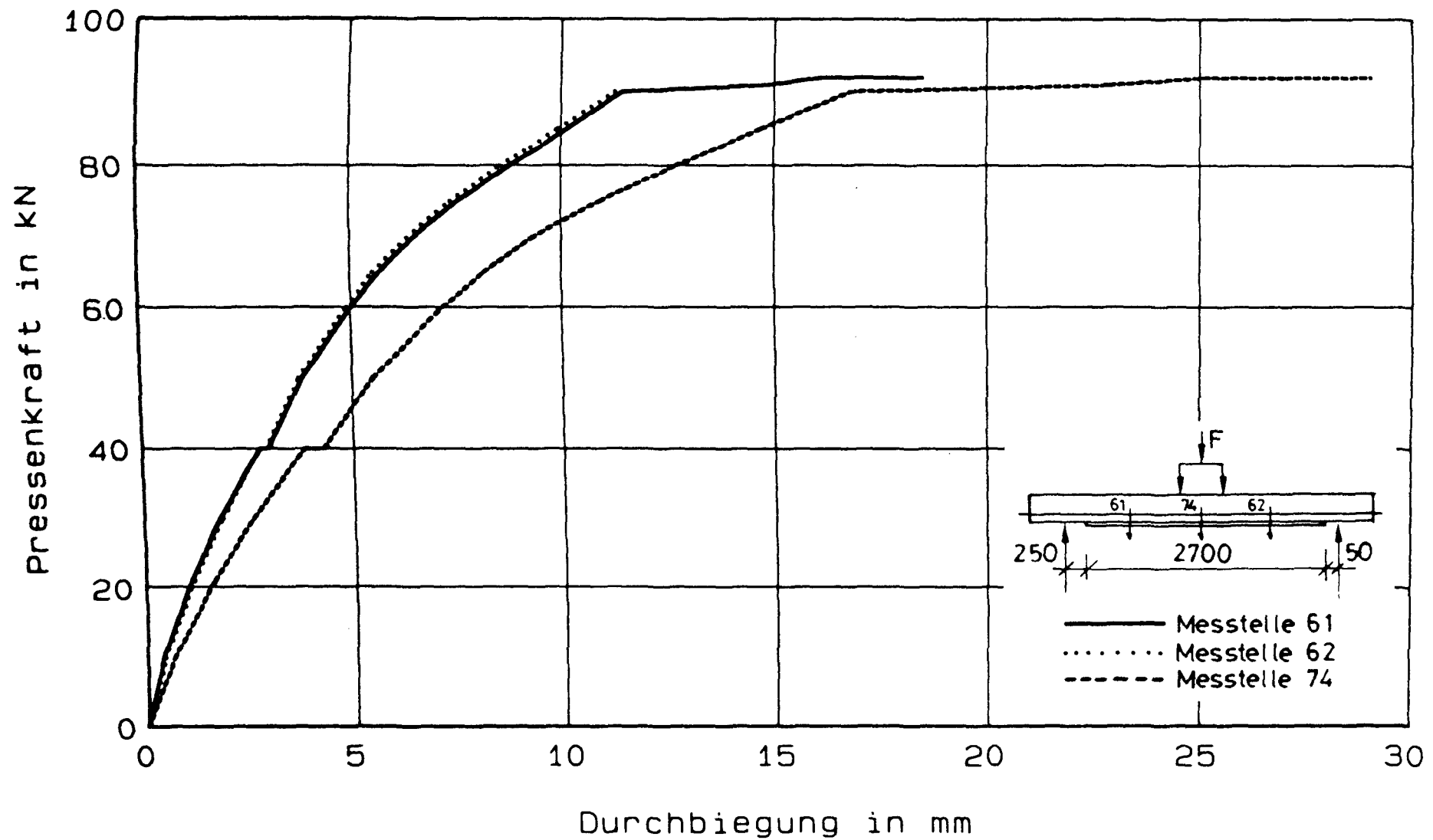


Bild 8.15 : Durchbiegung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB02, LF1

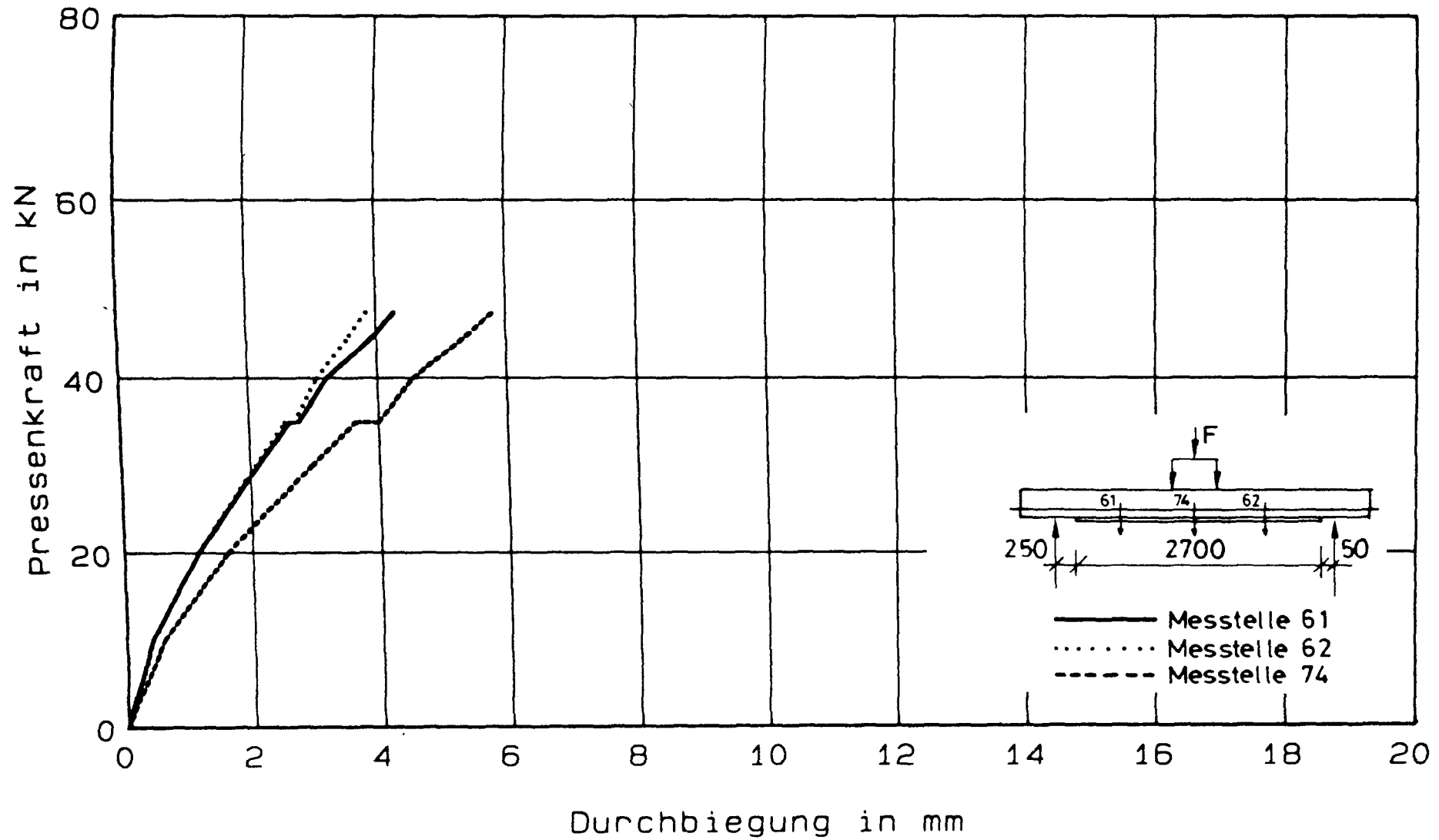


Bild 8.16 : Durchbiegung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB03, LF1

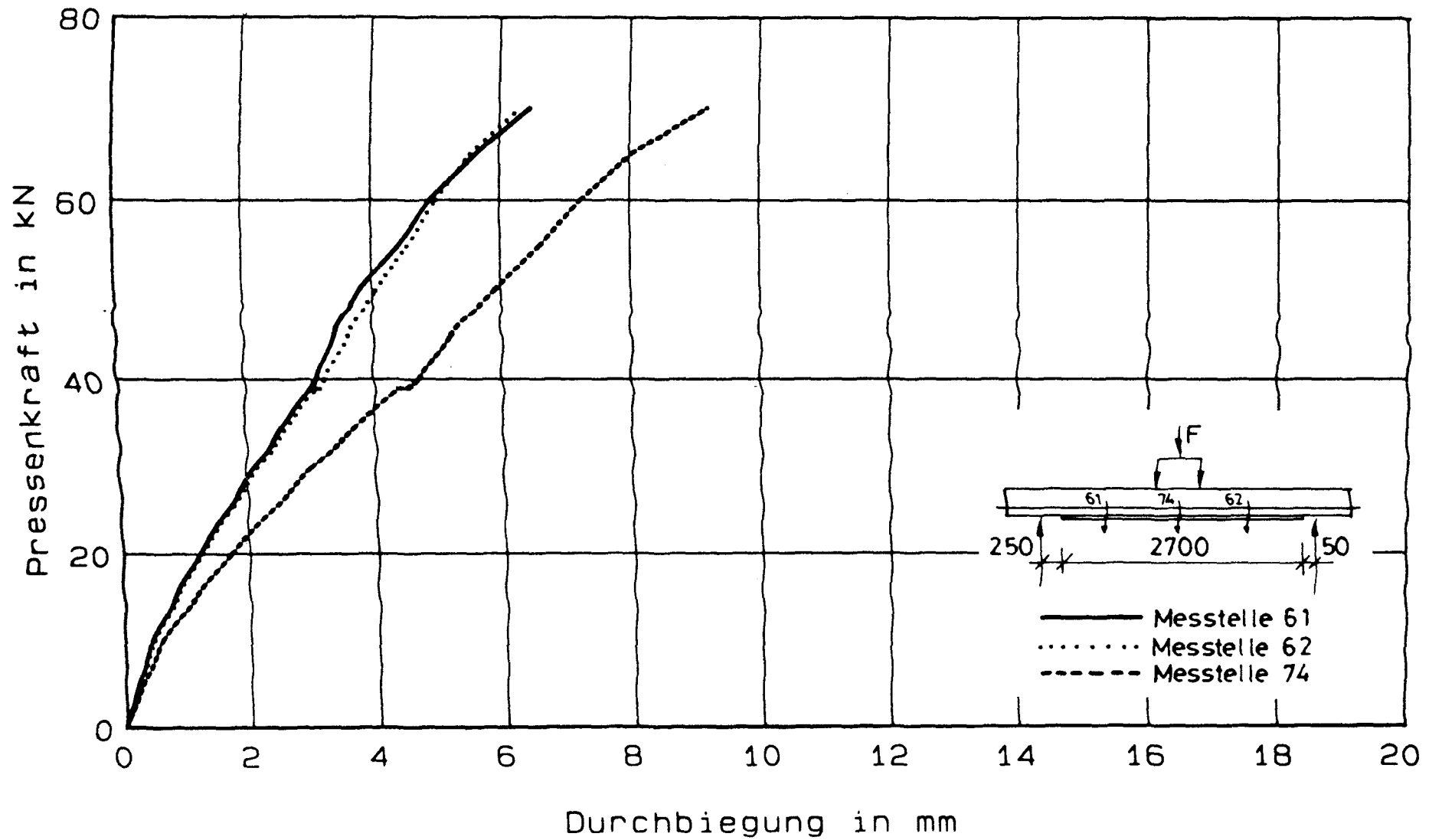


Bild 8.17 : Durchbiegung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB04, LF1

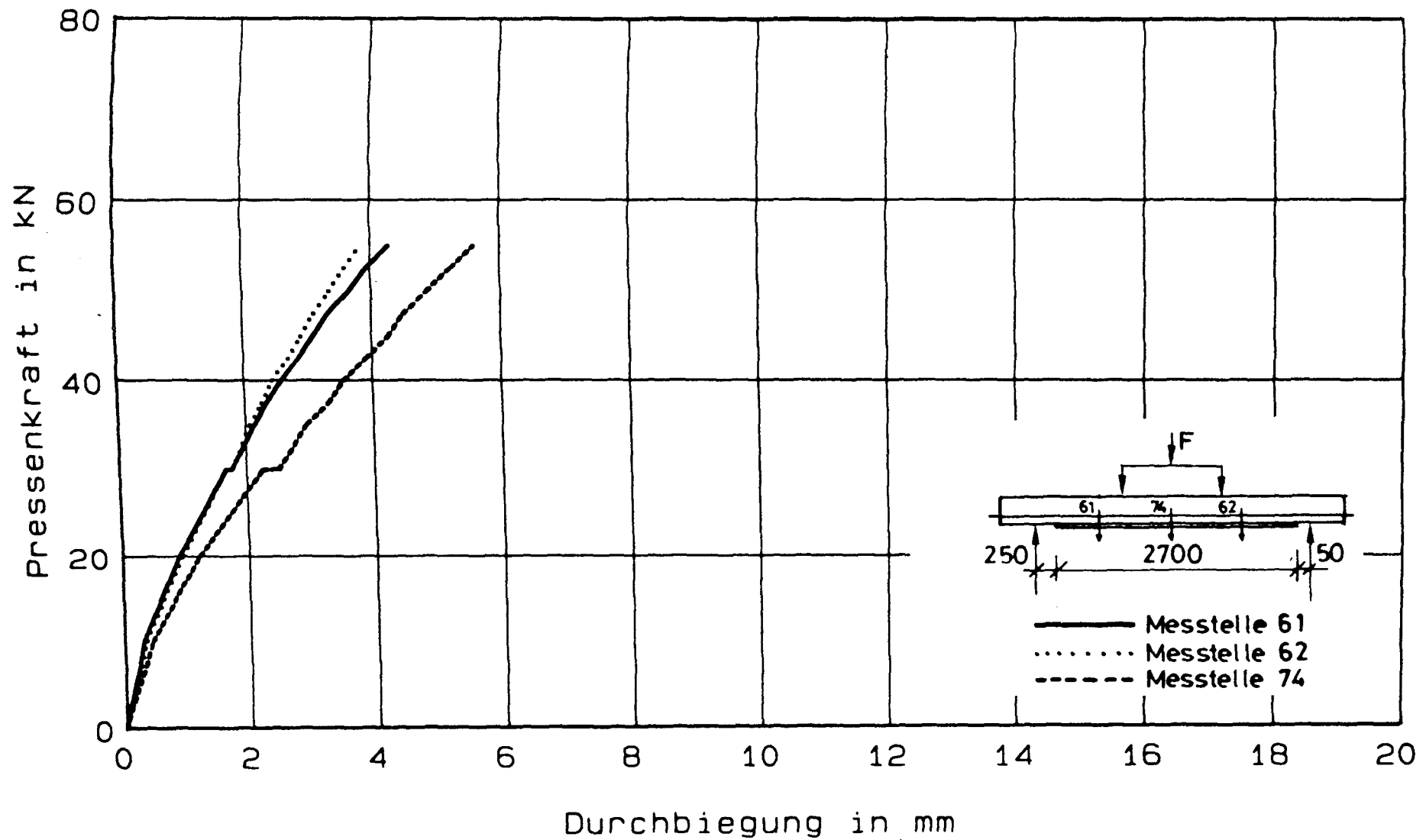


Bild 8.18 : Durchbiegung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB05, LF1

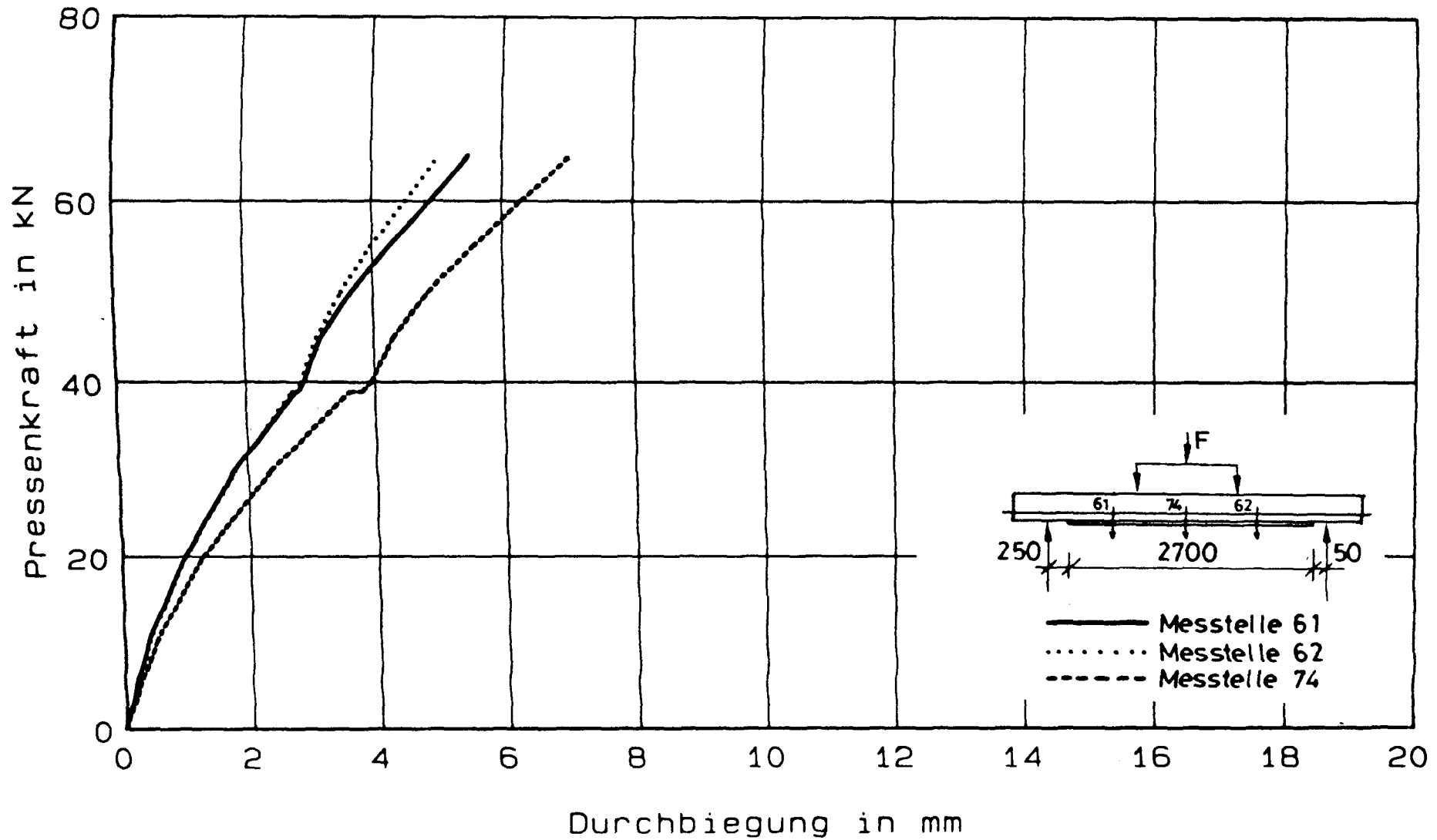


Bild 8.19 : Durchbiegung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB06, LF1

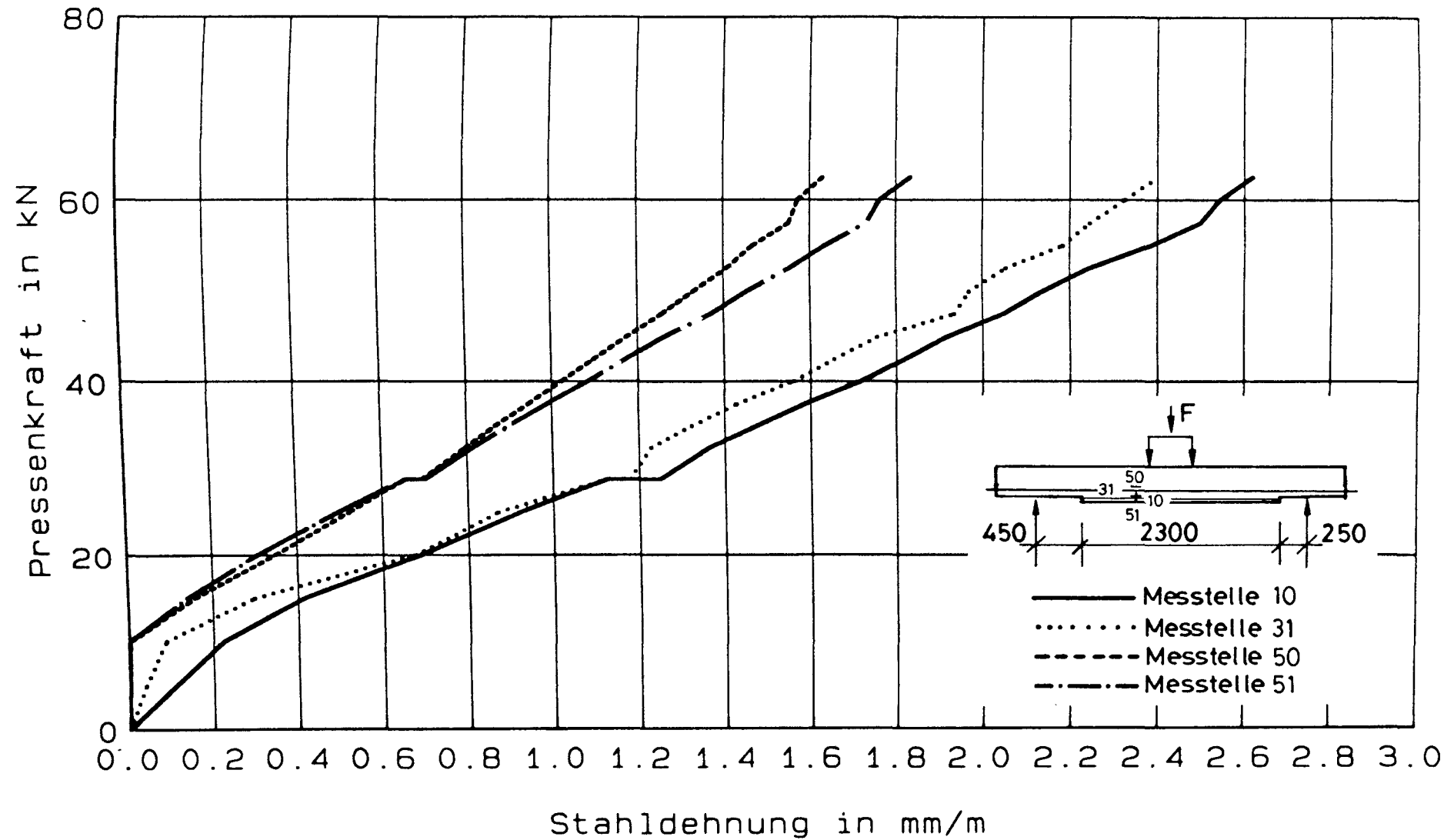


Bild 8.20 : Stahldehnung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB01, LF1

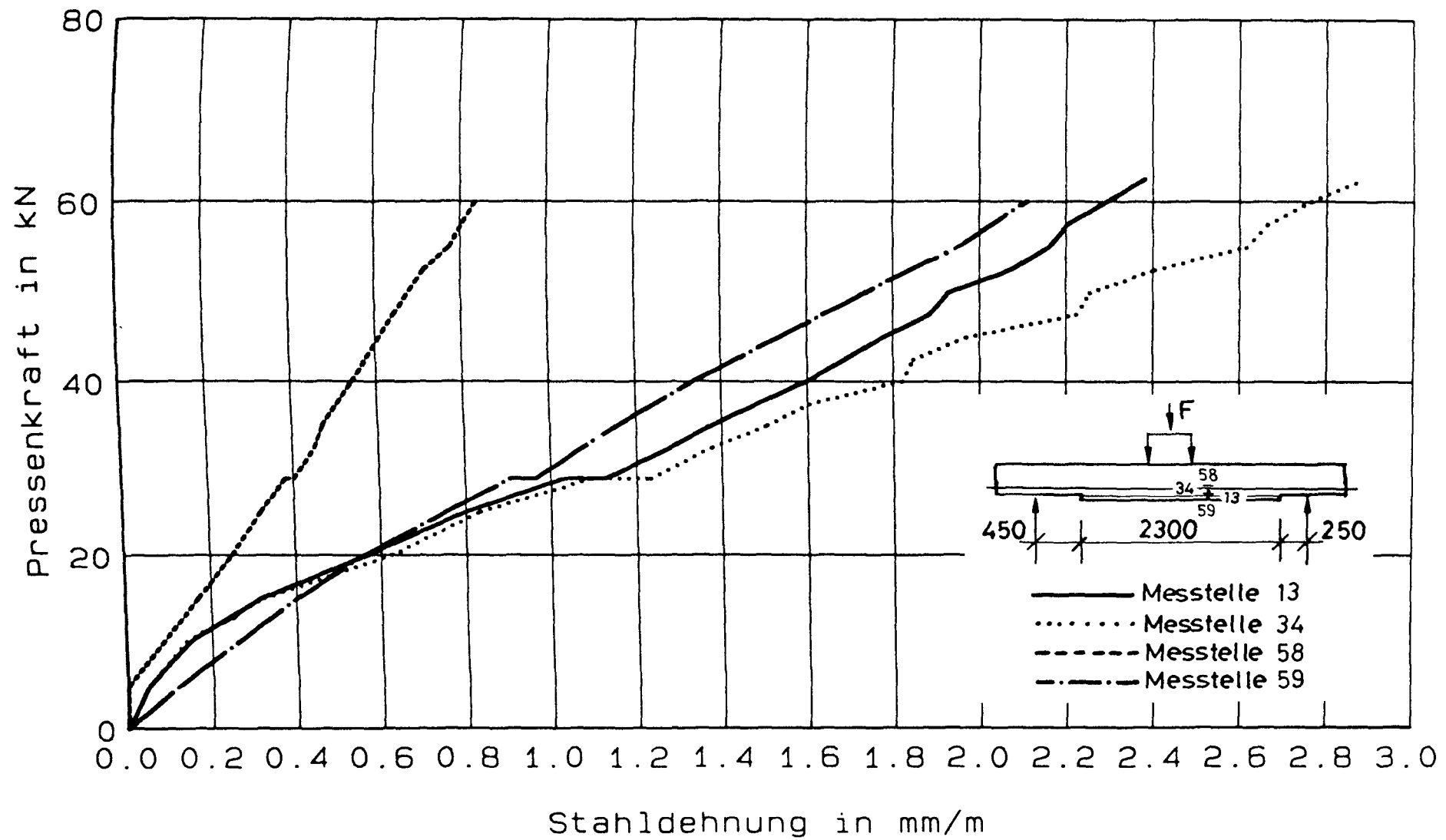


Bild 8.21 : Stahldehnung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB01, LF1

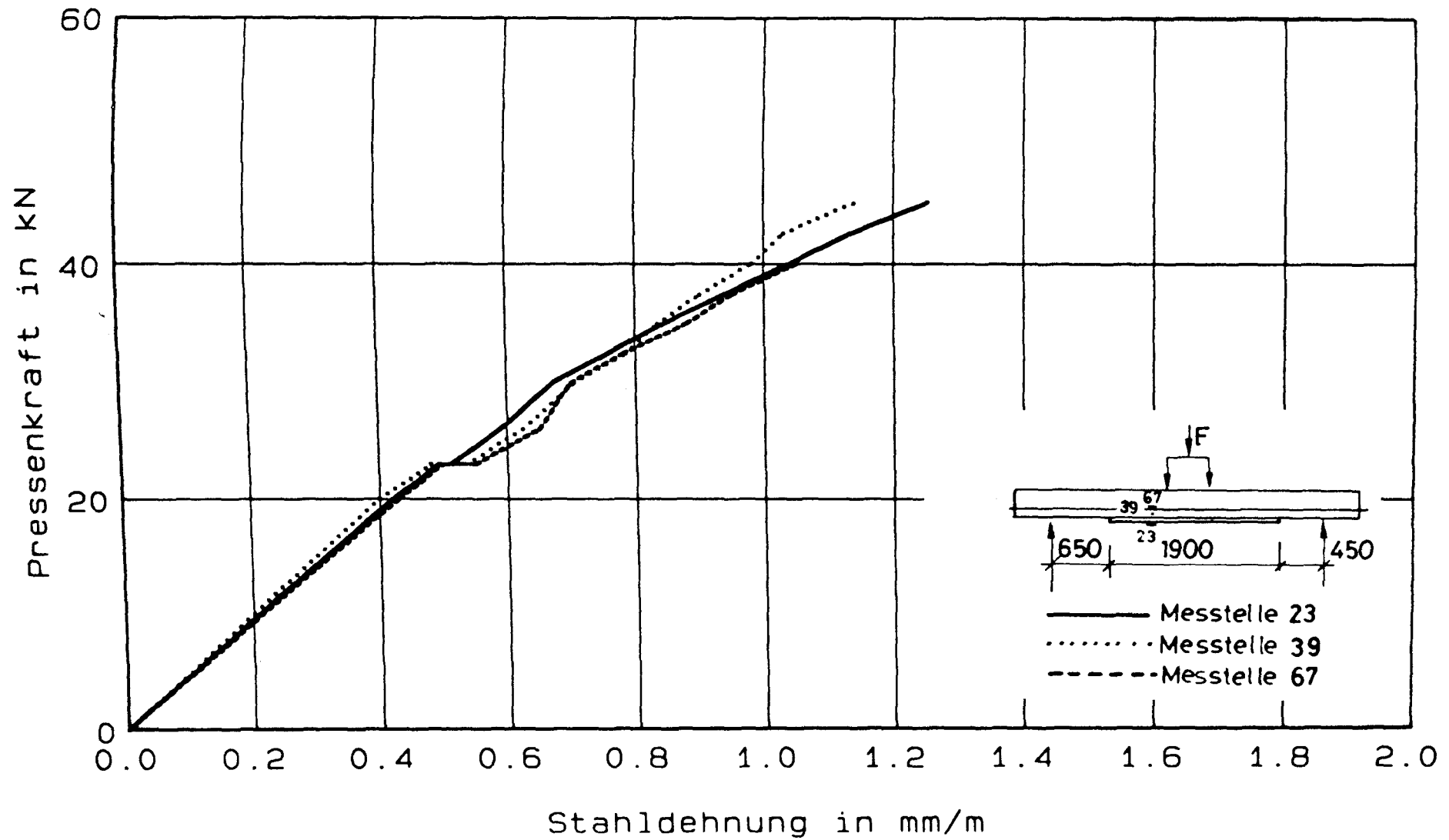


Bild 8.22 : Stahldehnung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB02, LF1

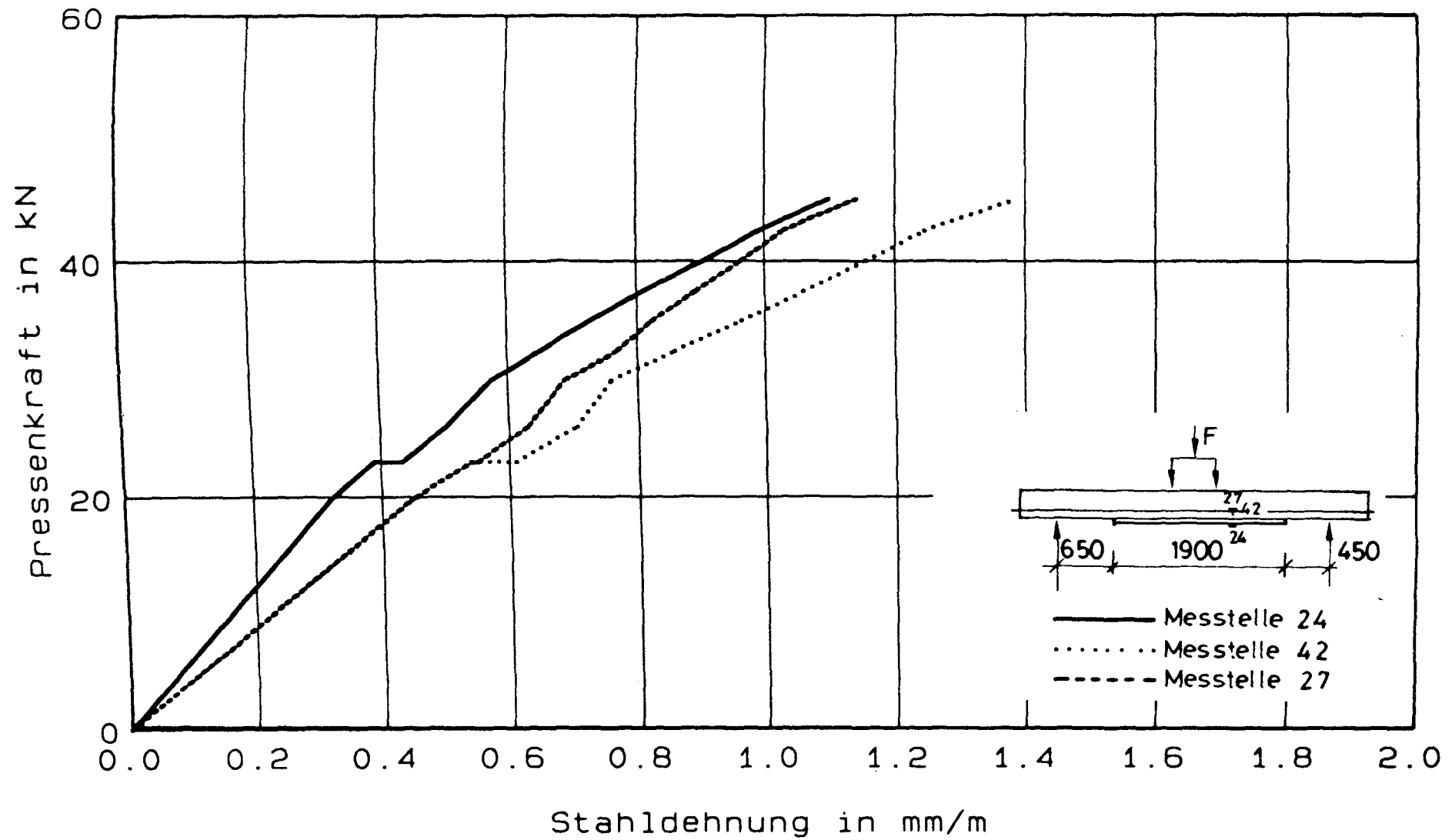


Bild 8.23 : Stahldehnung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB02, LF1

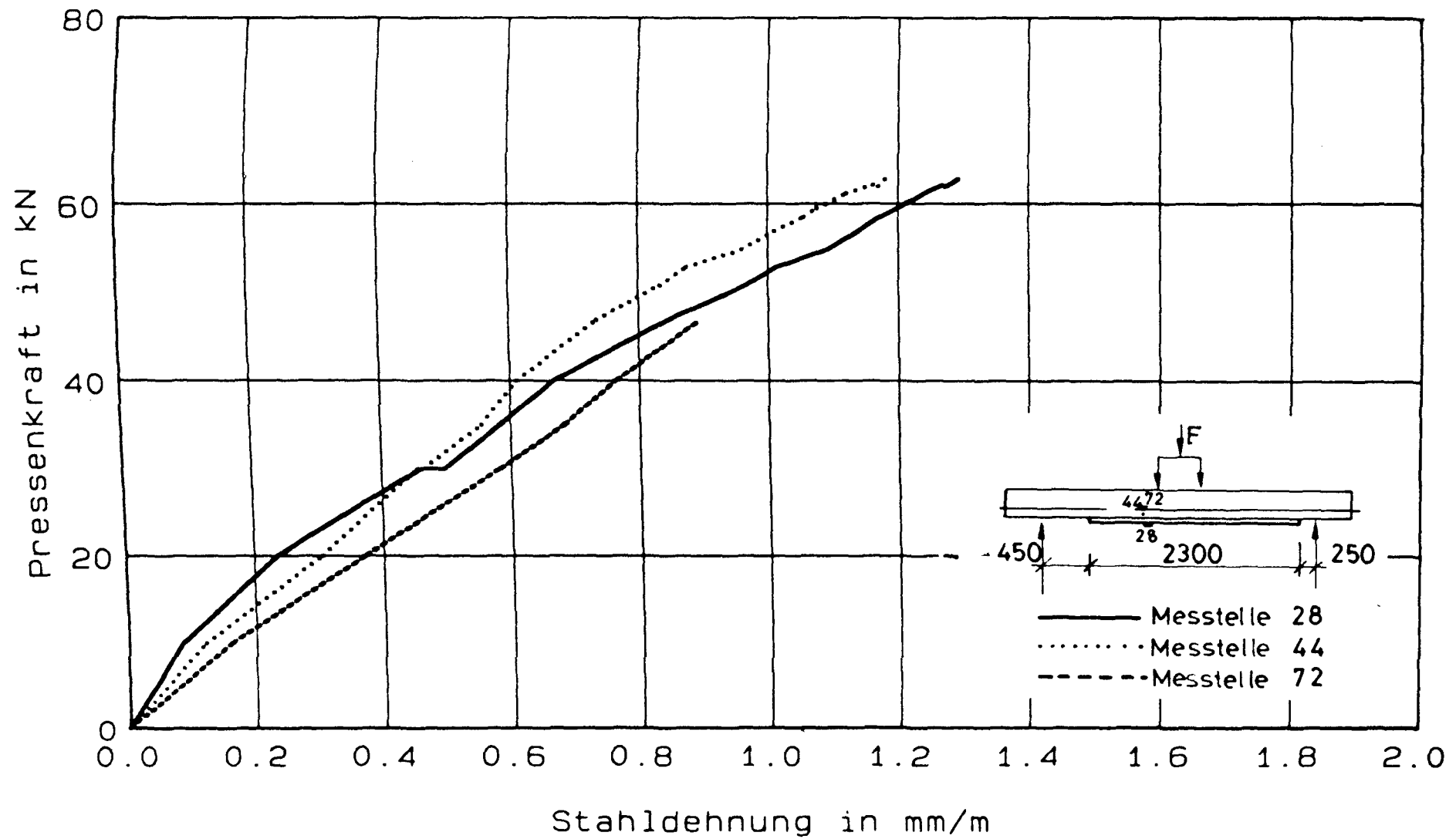


Bild 8.24 : Stahldehnung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB04, LF1

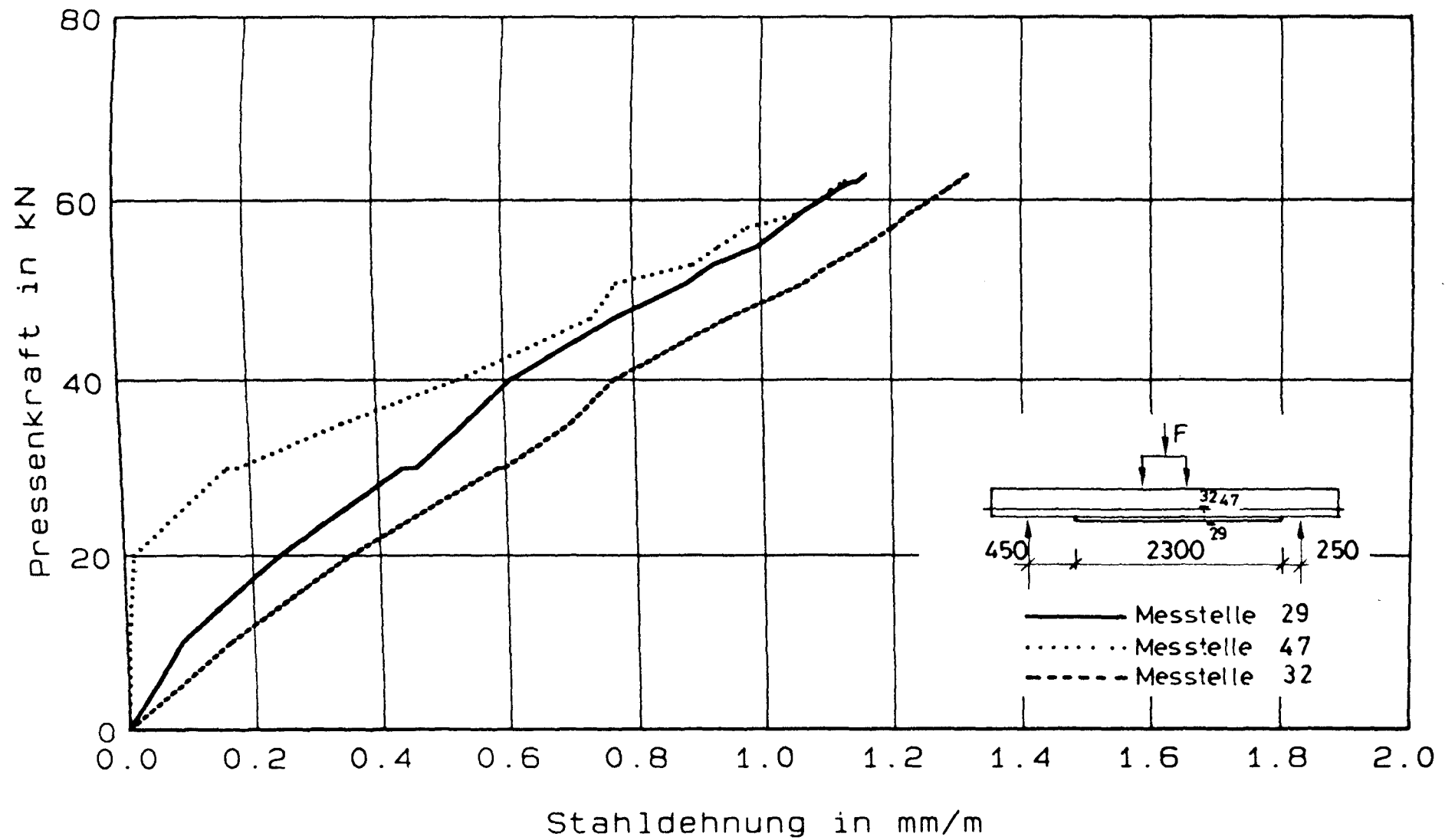


Bild 8.25 : Stahldehnung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB04, LF1

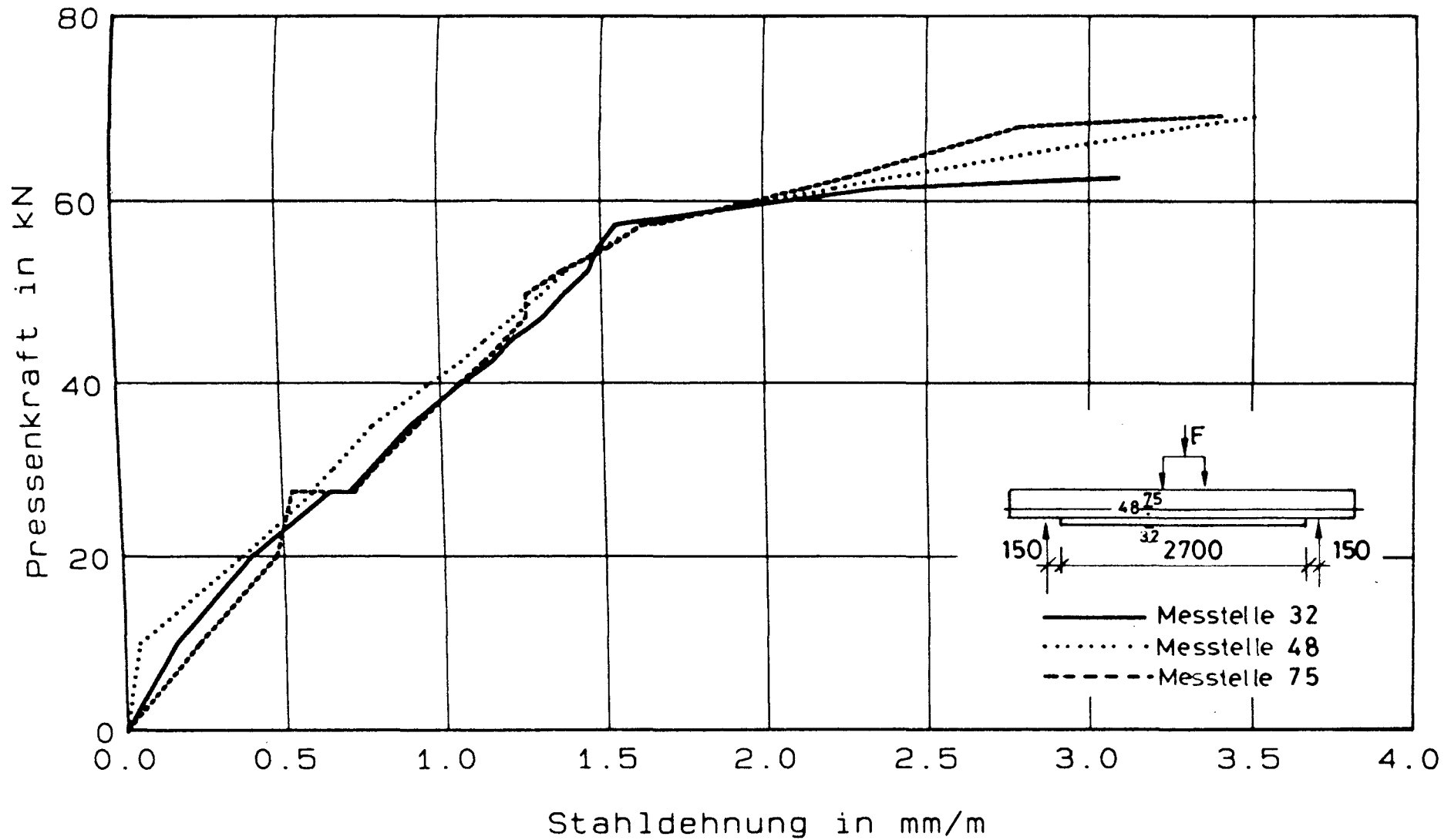


Bild 8.26 : Stahldehnung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB06, LF1

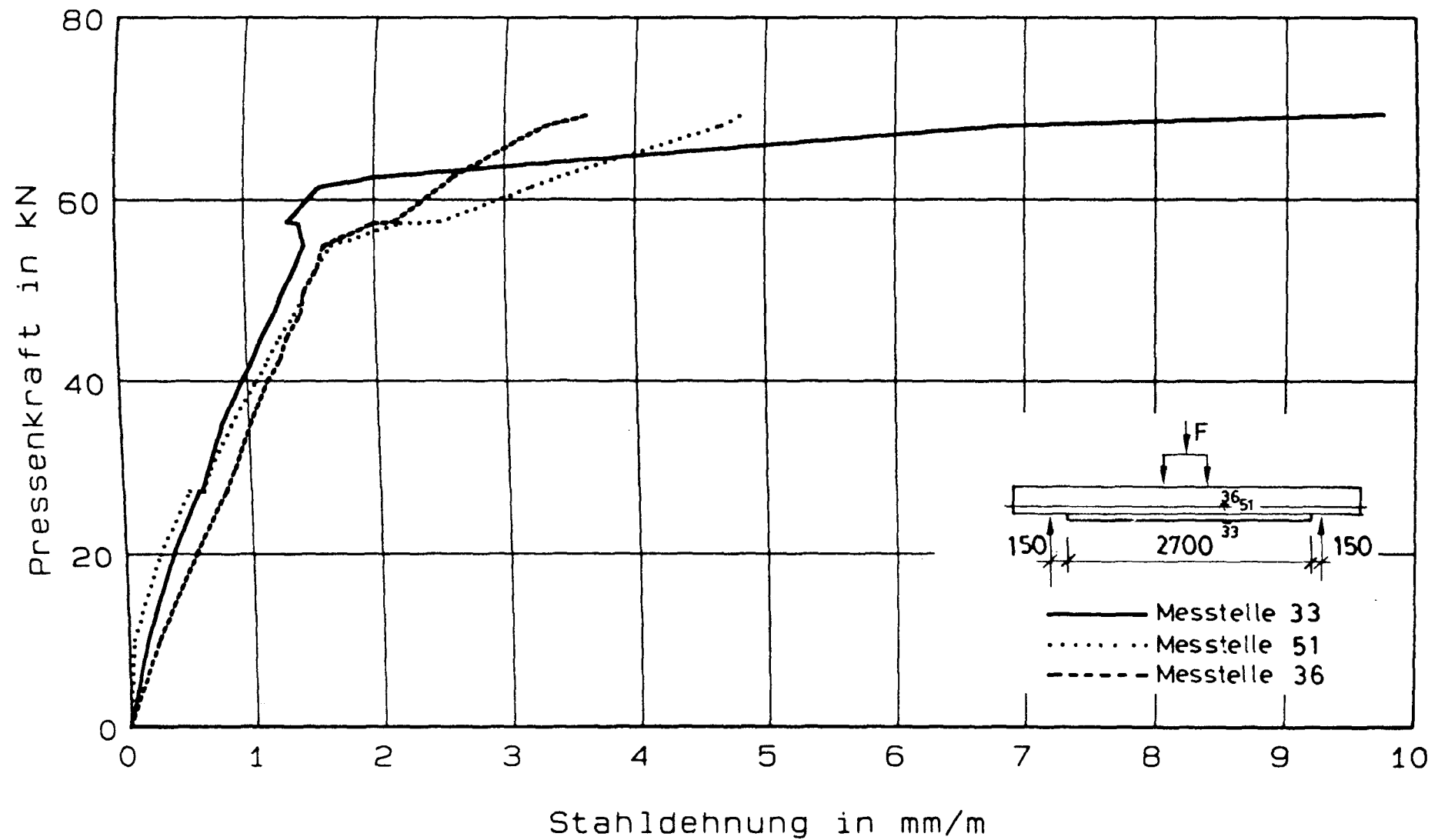


Bild 8.27 : Stahldehnung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB06, LF1

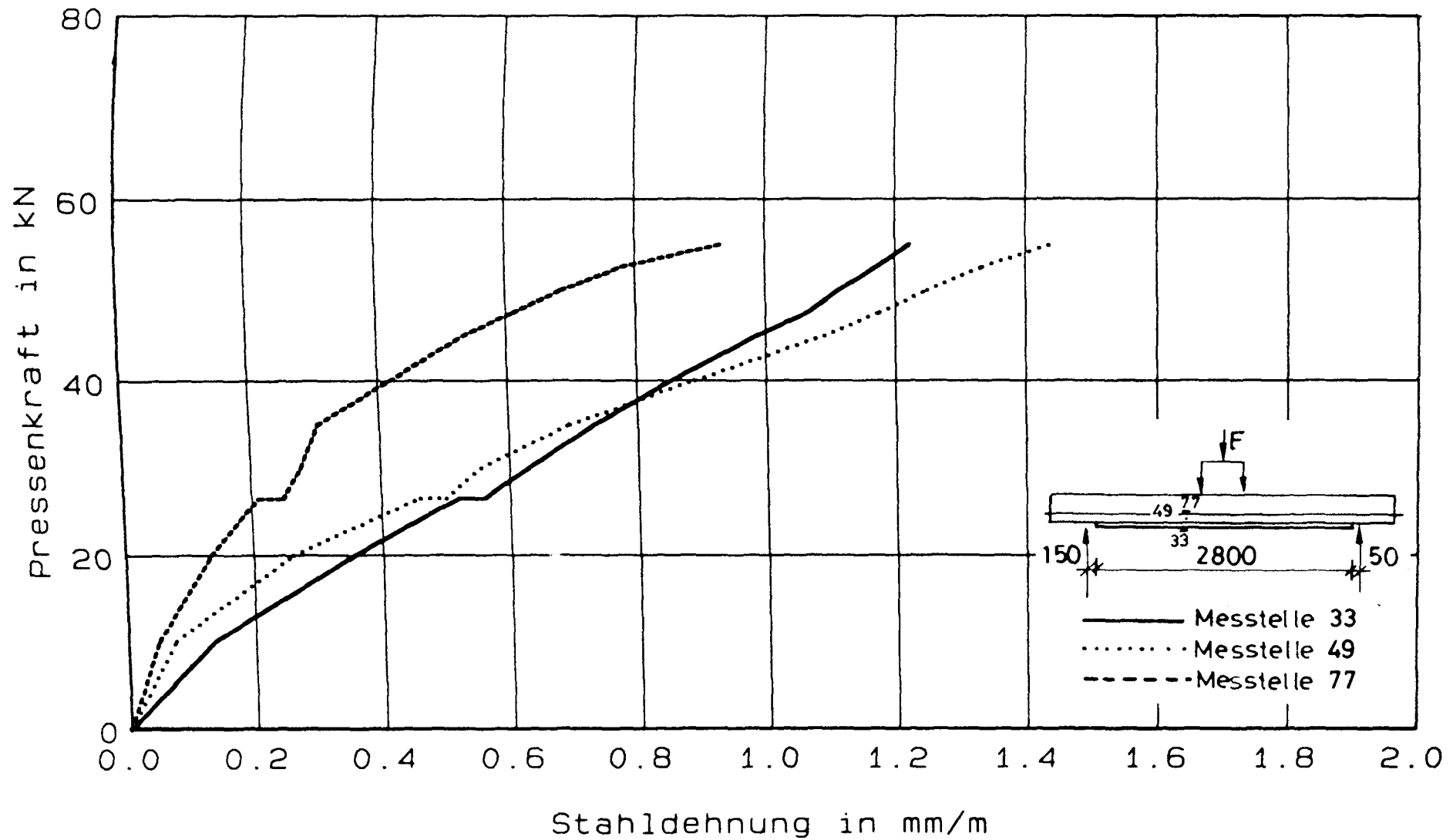


Bild 8.28 : Stahldehnung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB08, LF1

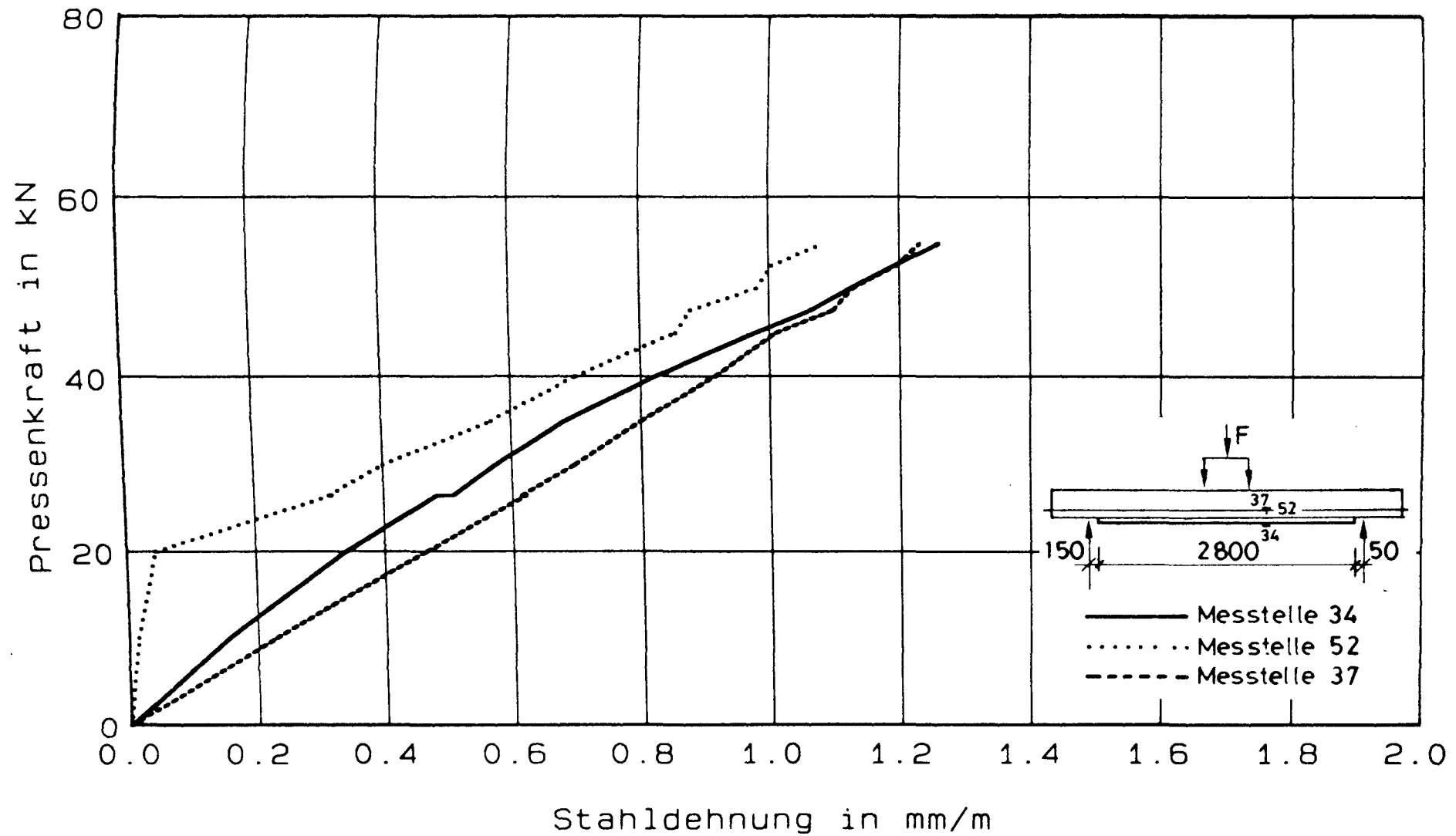


Bild 8.29 : Stahldehnung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB08, LF1

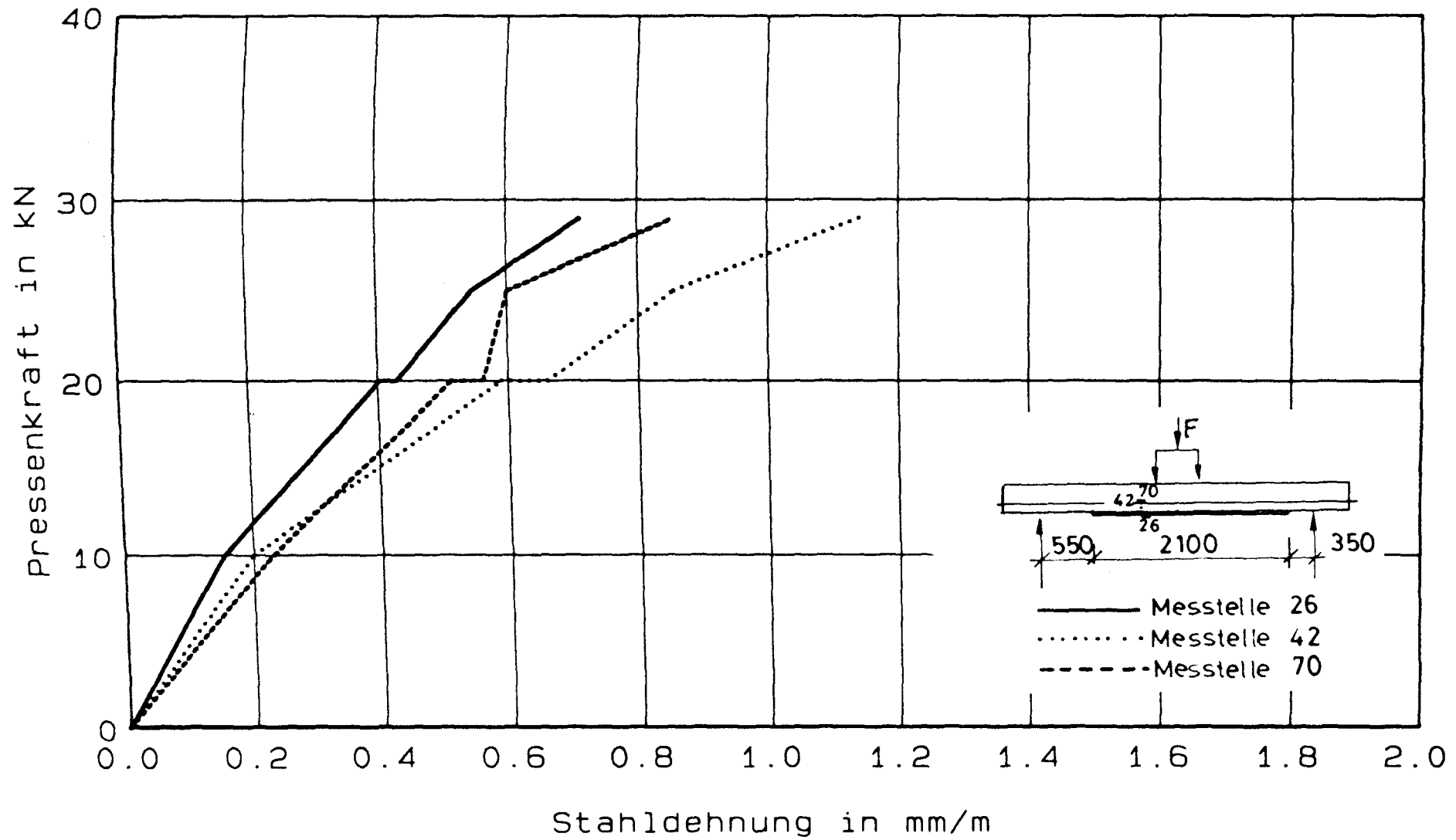


Bild 8.30 : Stahldehnung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB09, LF1

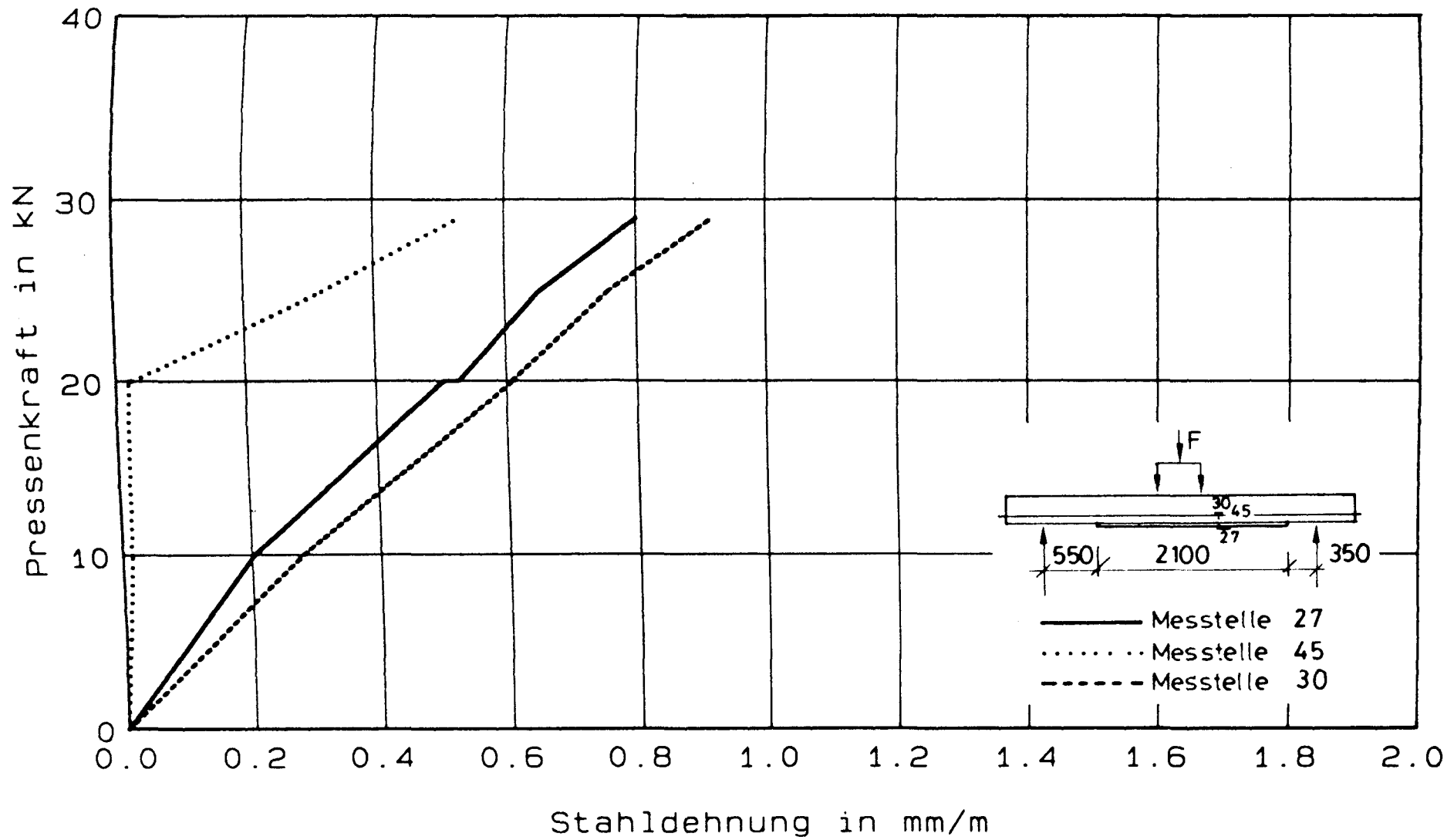


Bild 8.31 : Stahldehnung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB09, LF1

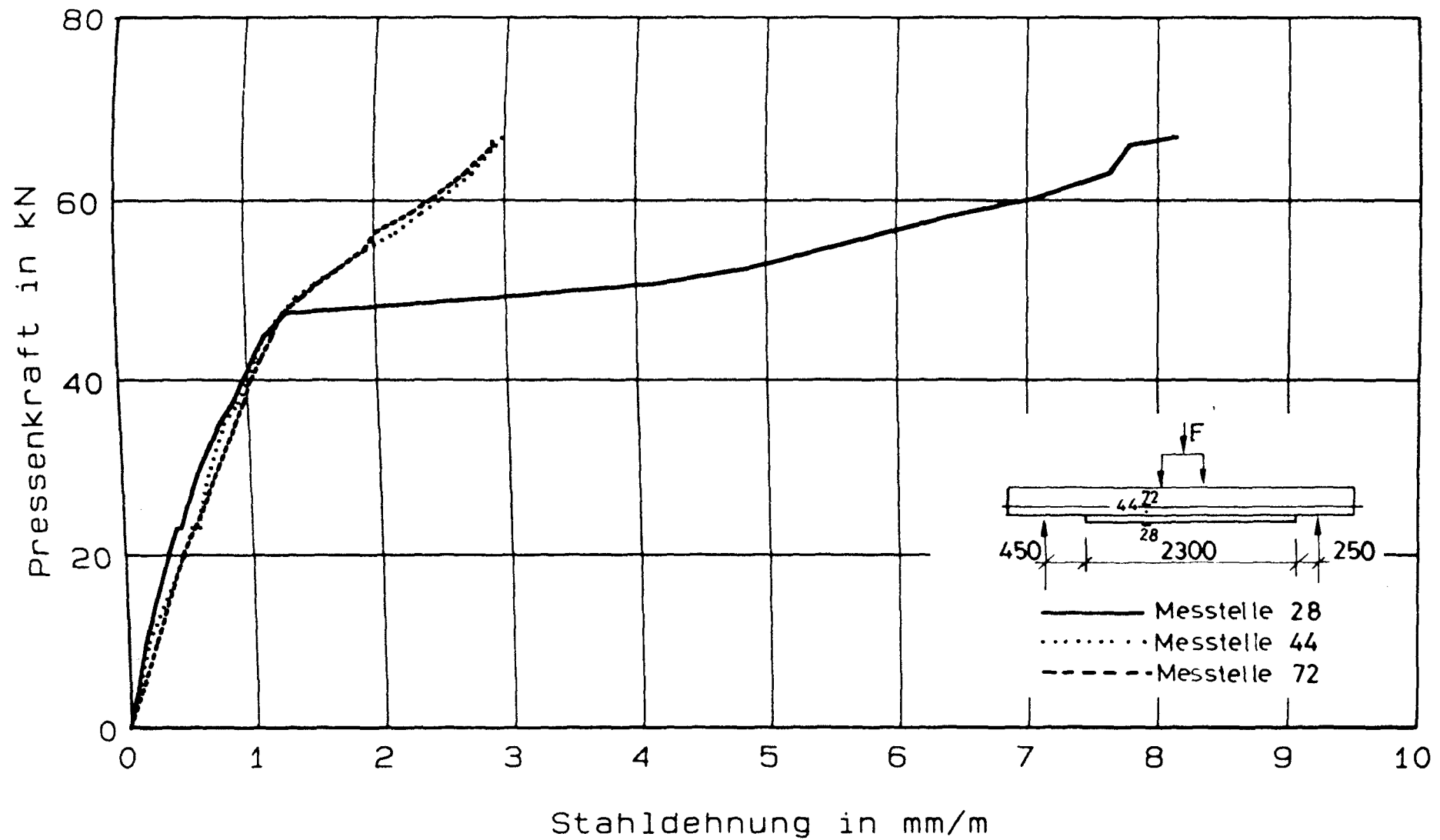


Bild 8.32 : Stahldehnung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB10, LF1

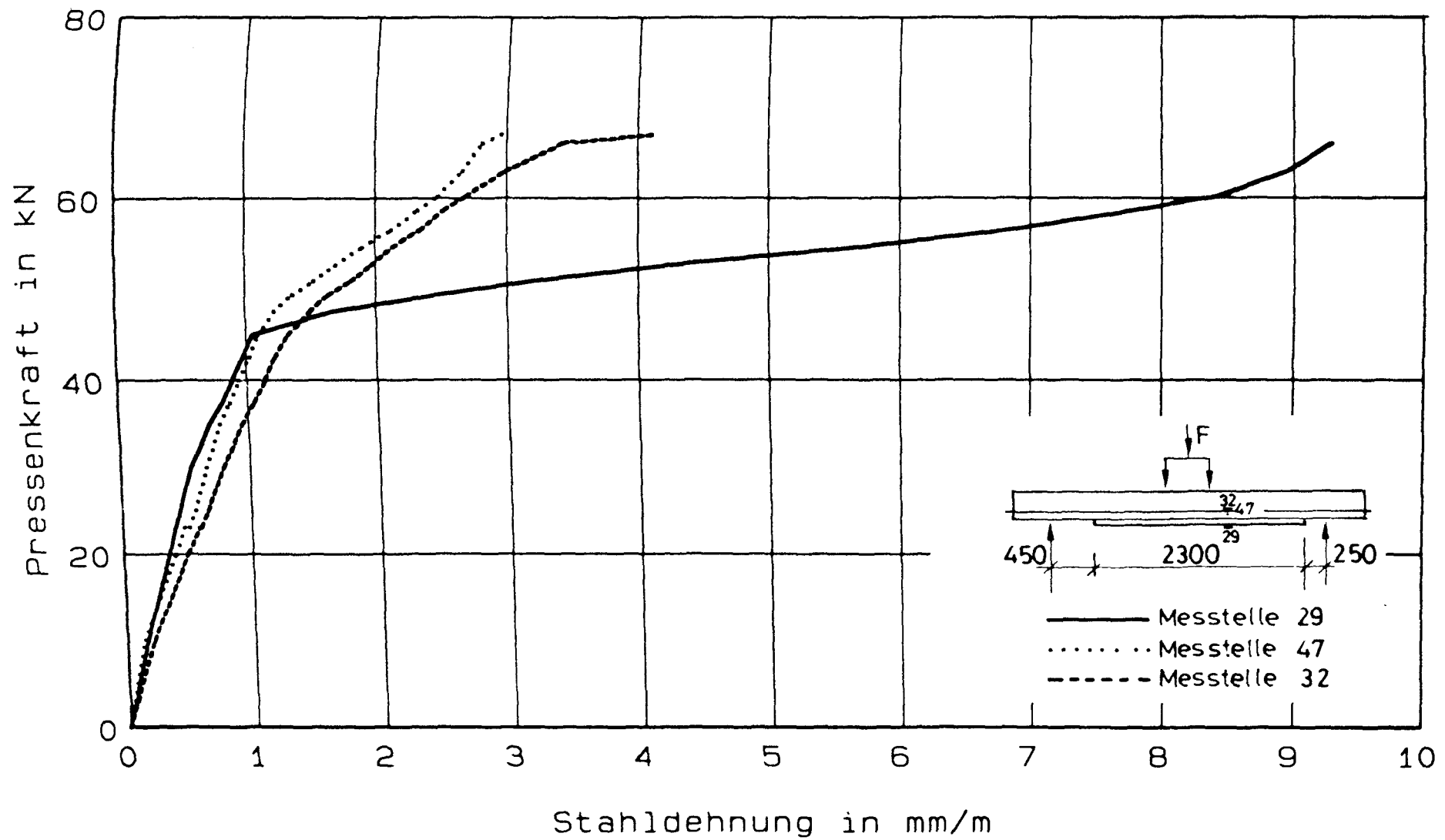


Bild 8.33 : Stahldehnung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB10, LF1

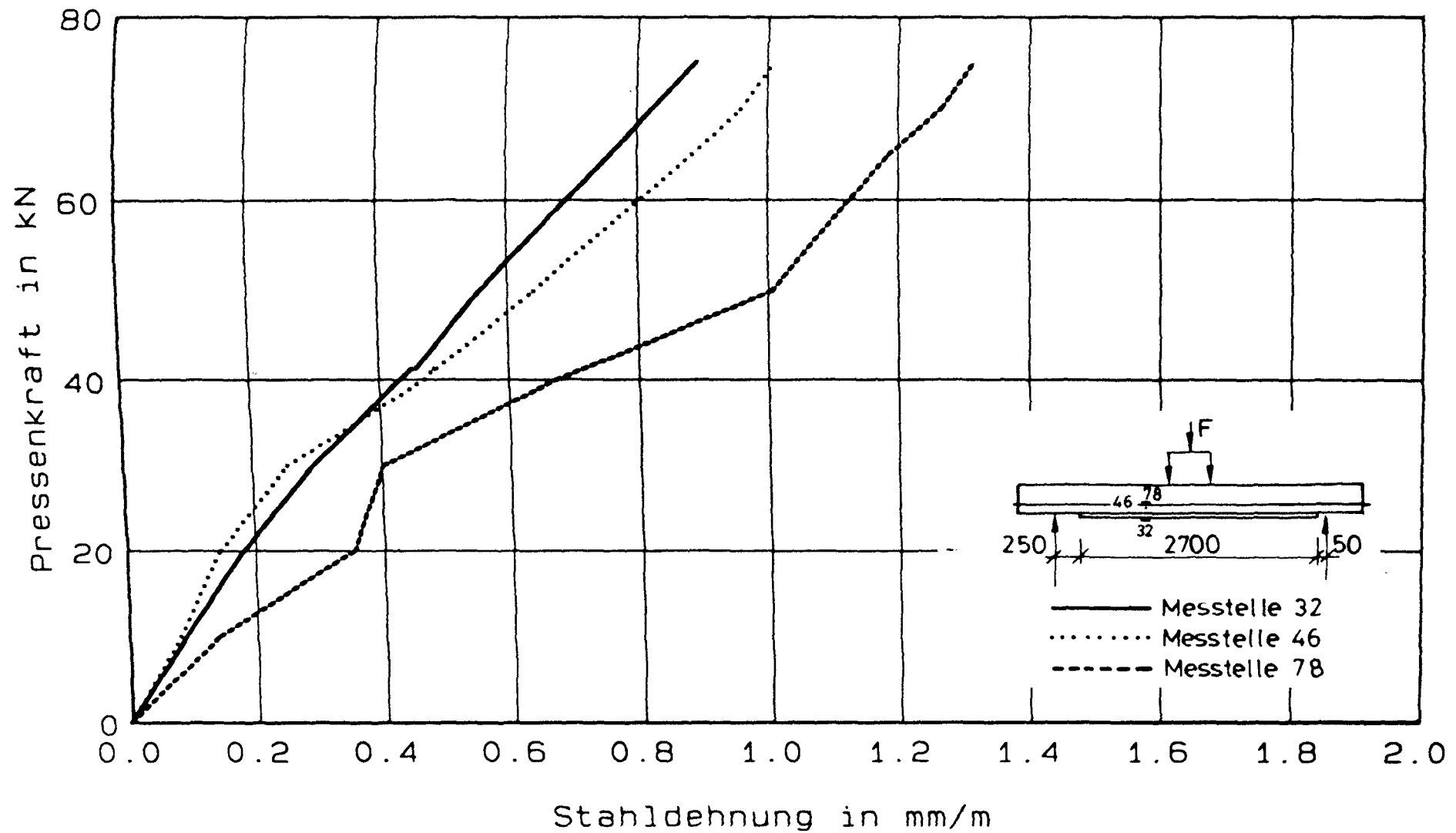


Bild 8.34 : Stahldehnung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB01, LF1

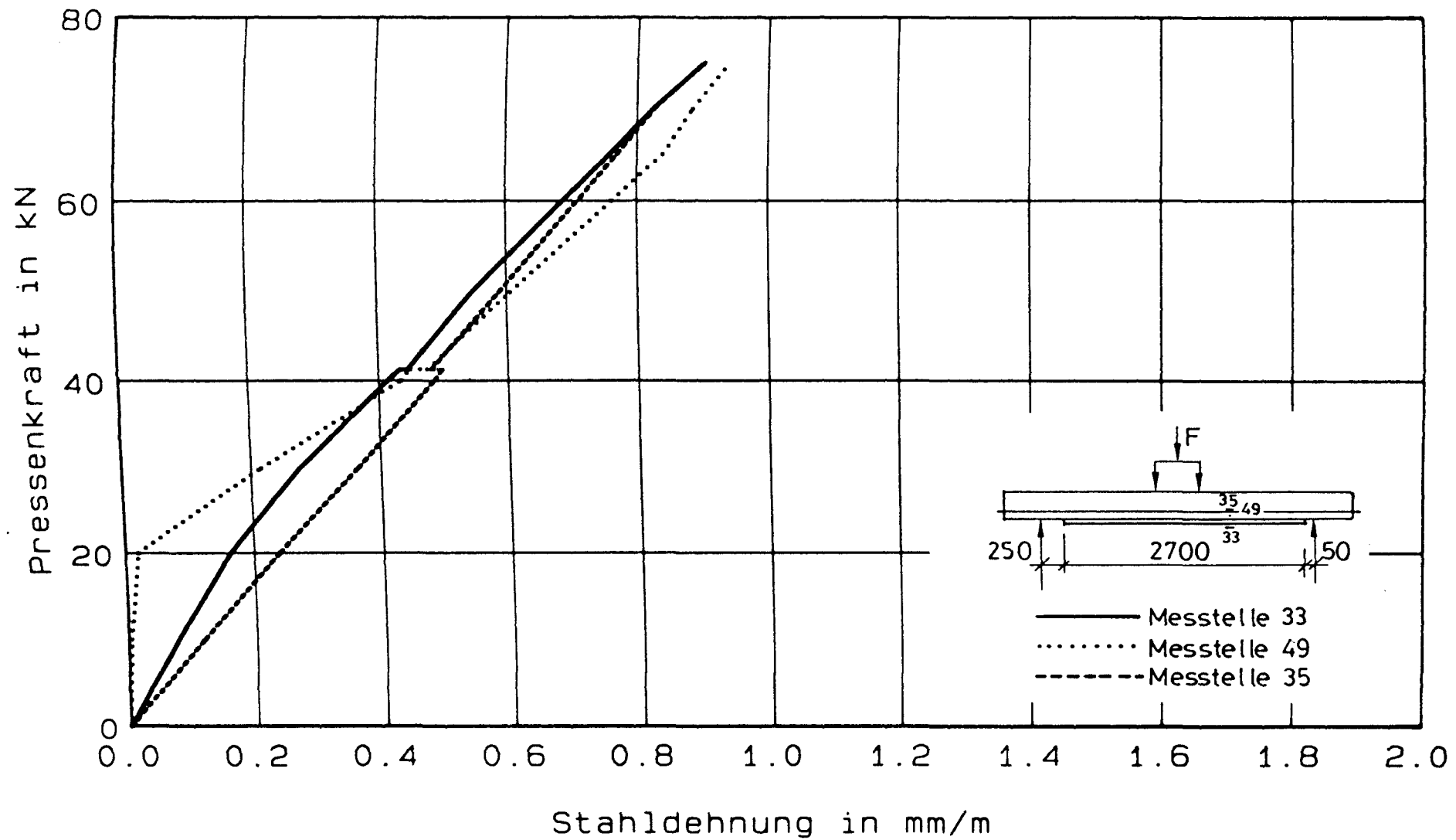


Bild 8.35 : Stahldehnung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB01, LF1

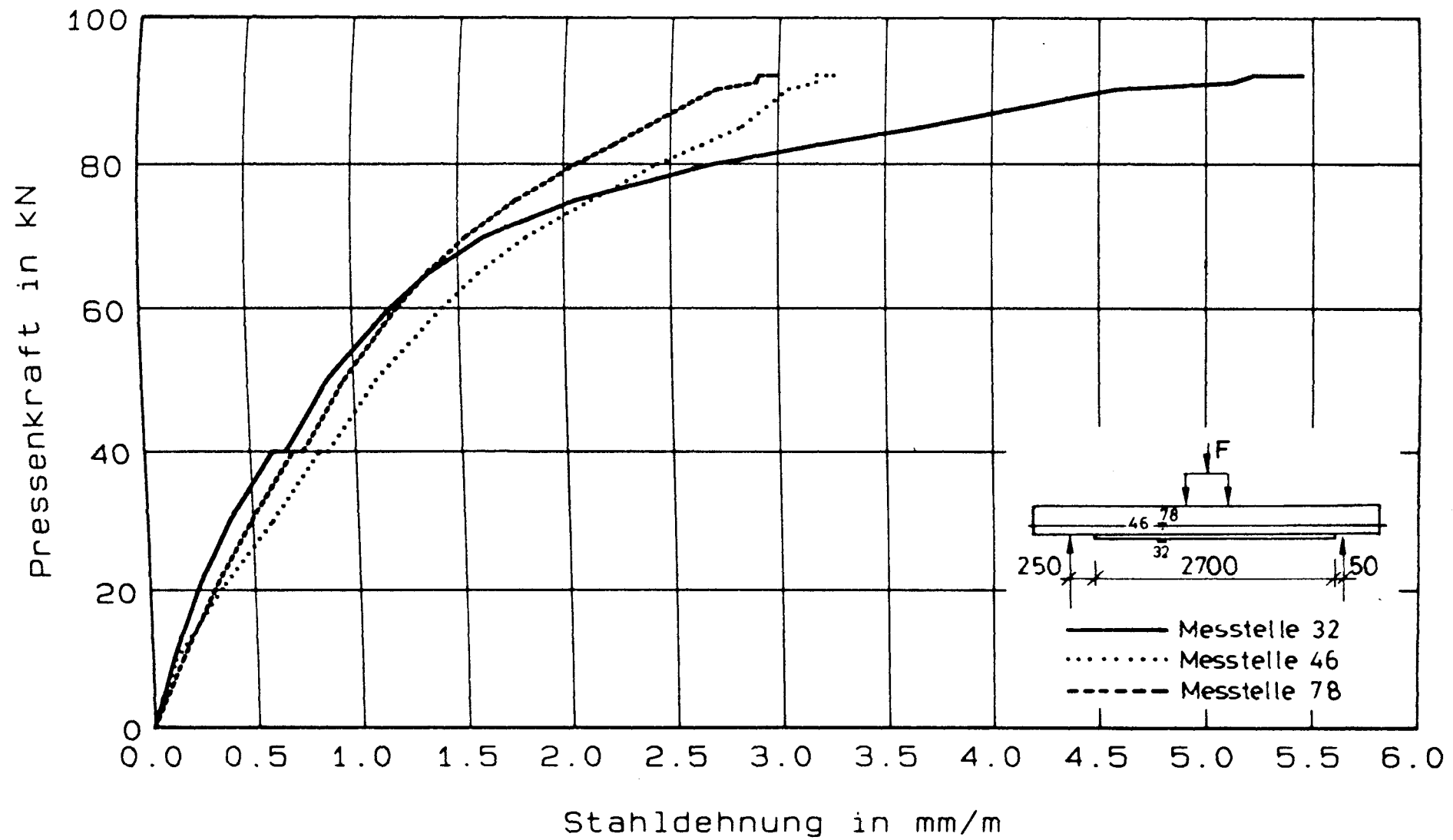


Bild 8.36 : Stahldehnung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB02, LF1

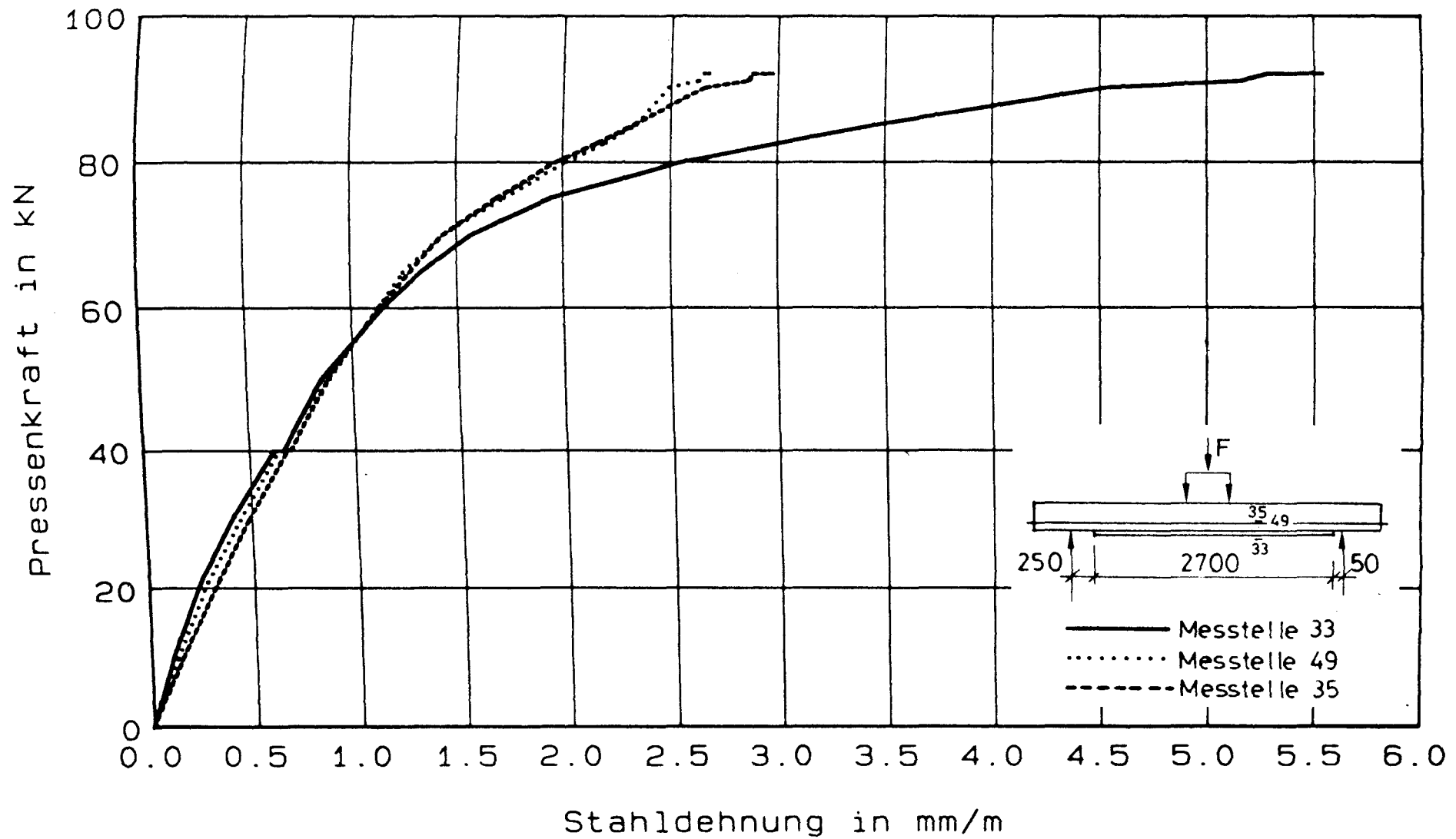


Bild 8.37 : Stahldehnung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
– Balken SB02, LF1

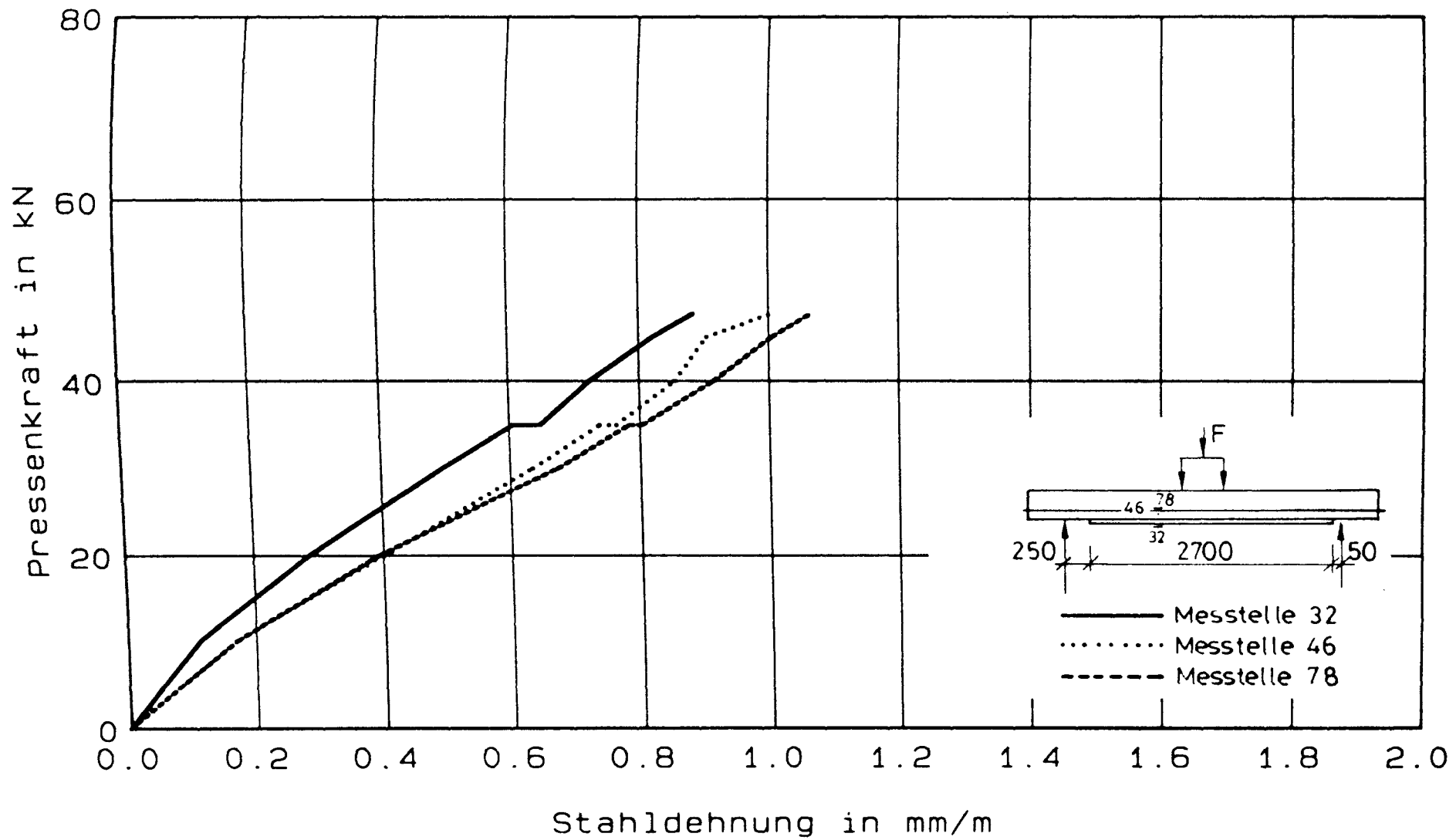


Bild 8.38 : Stahldehnung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB03, LF1

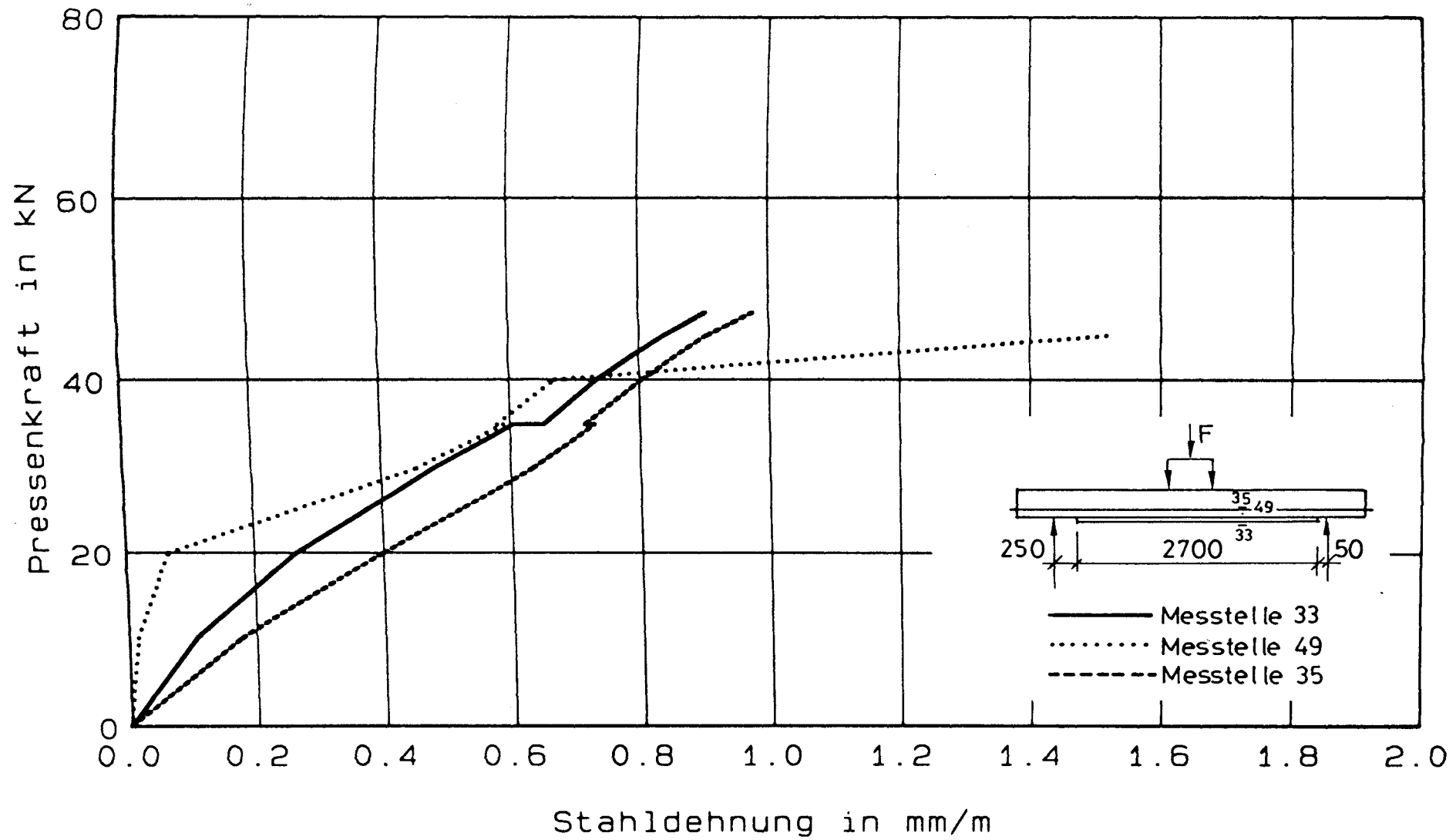


Bild 8.39 : Stahldehnung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB03, LF1

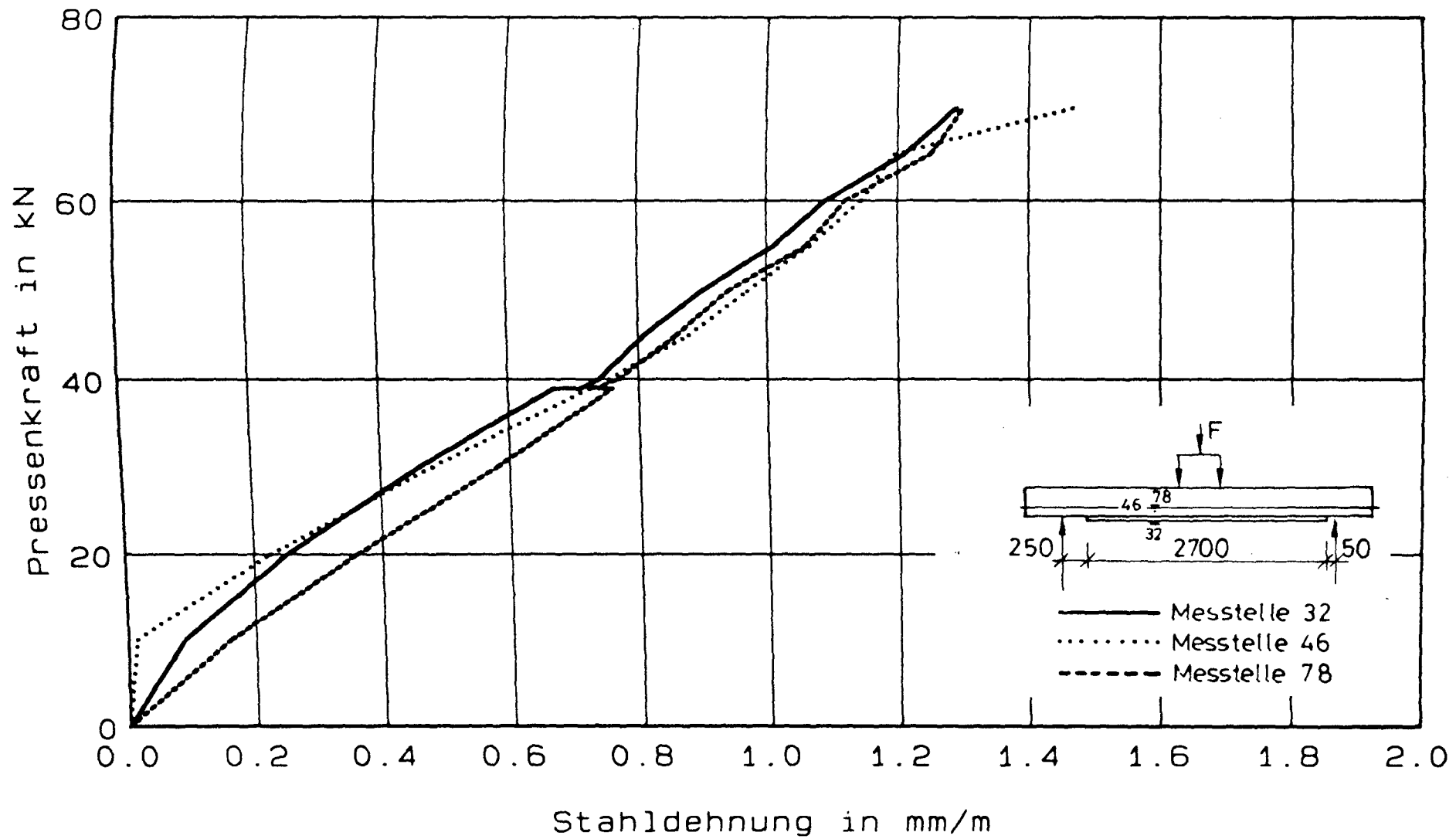


Bild 8.40 : Stahldehnung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB04, LF1

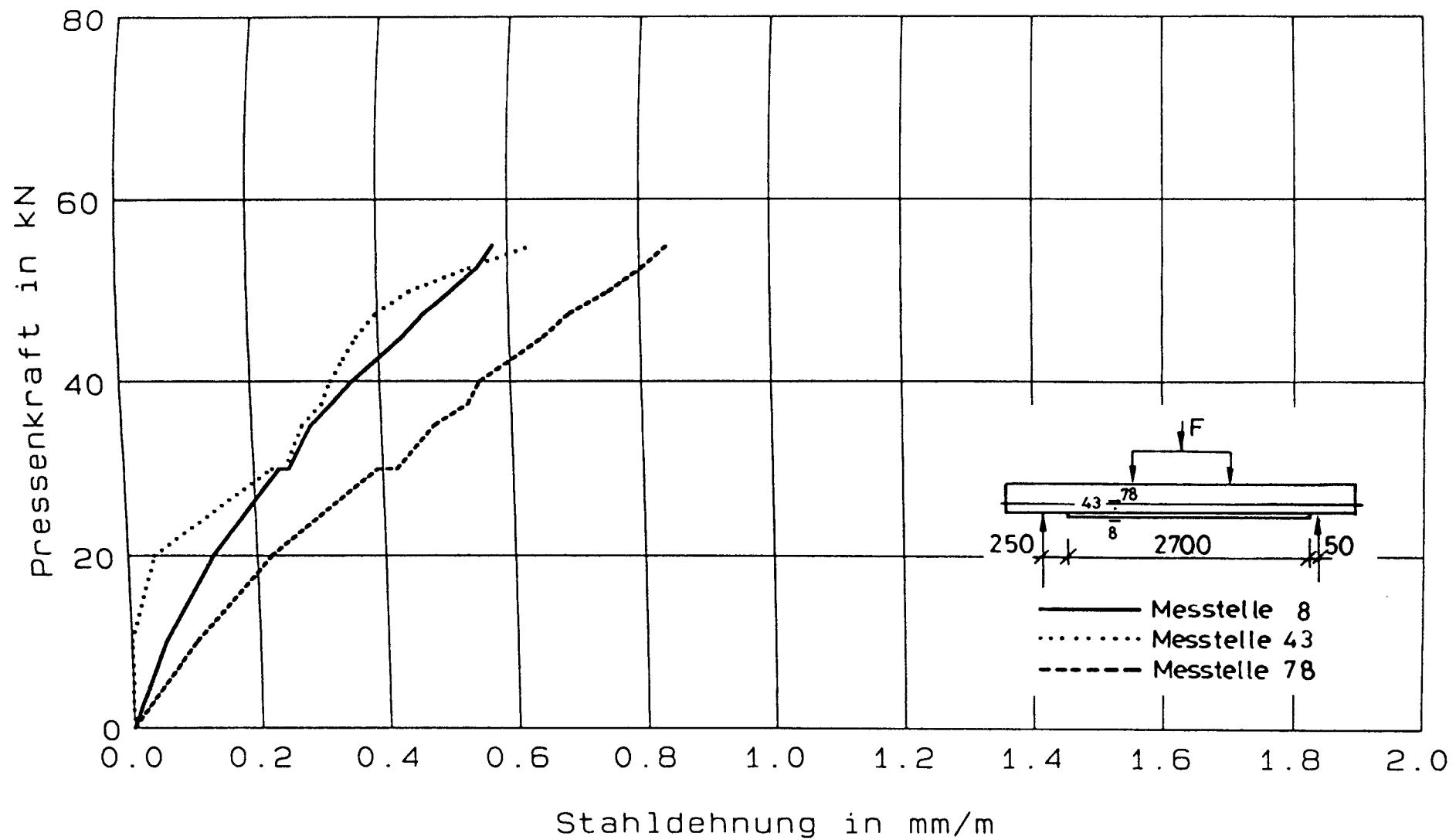


Bild 8.42 : Stahldehnung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB05, LF1

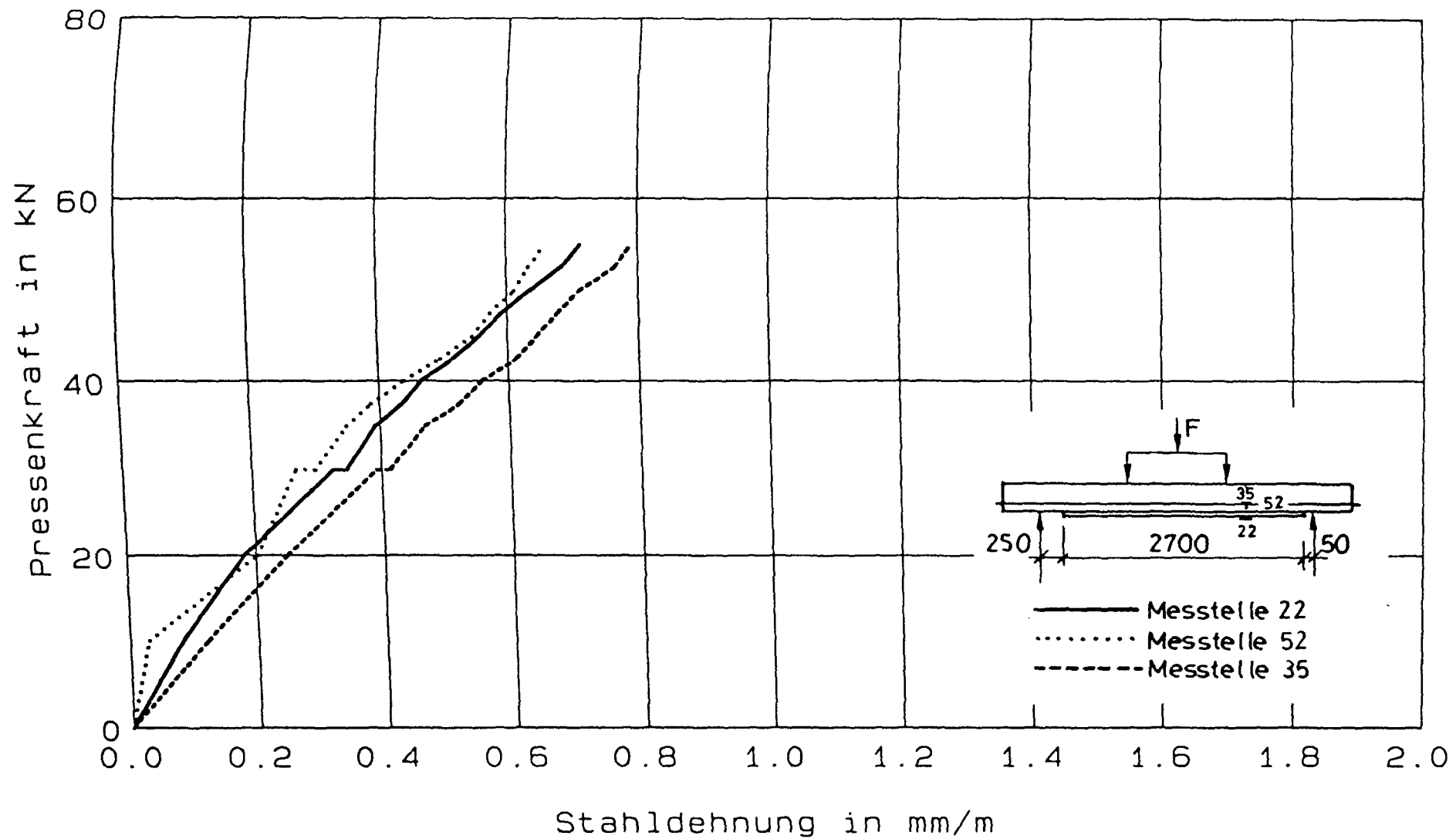


Bild 8.43 : Stahldehnung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
 - Balken SB05, LF1

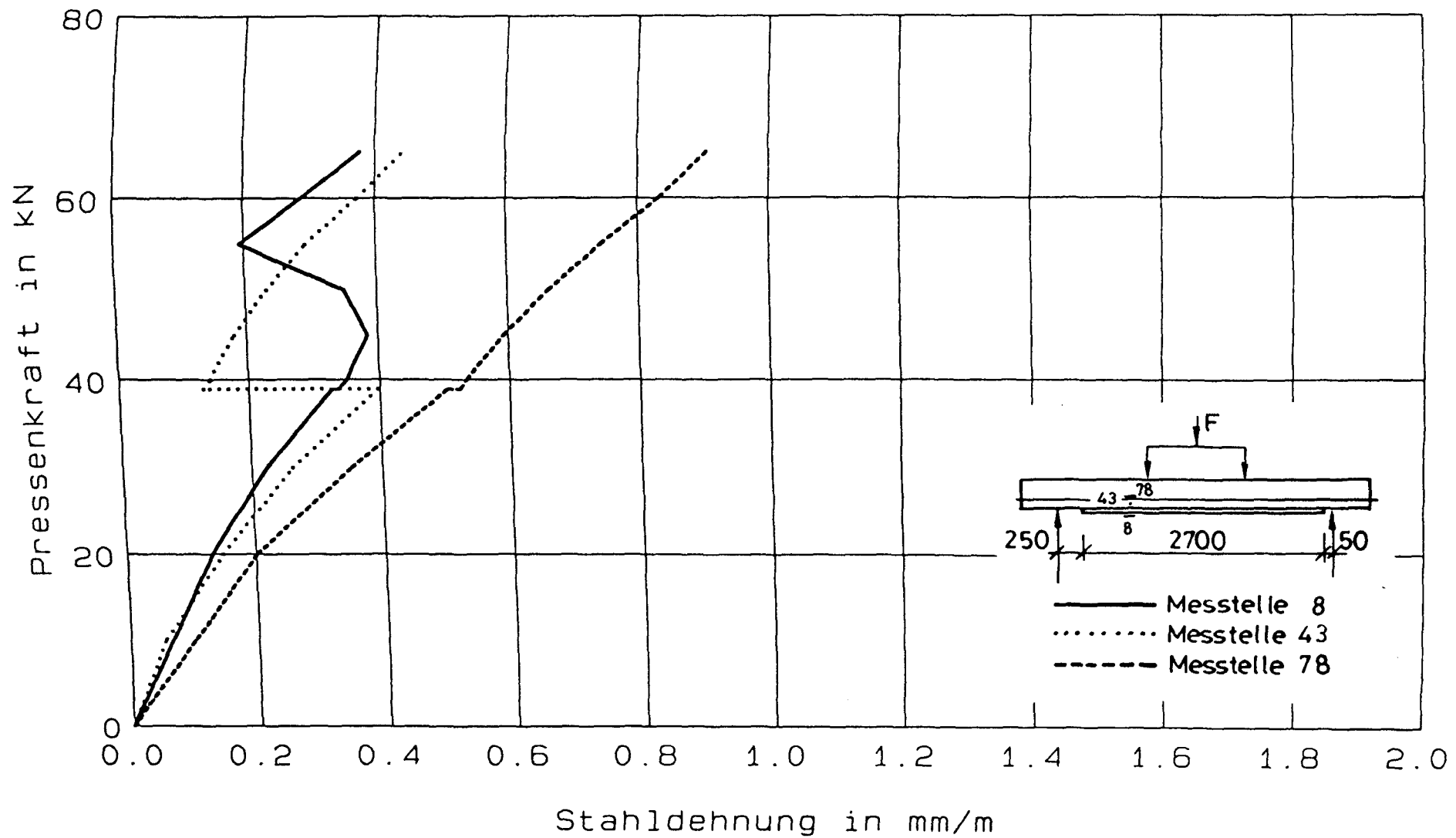


Bild 8.44 : Stahldehnung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB06, LF1

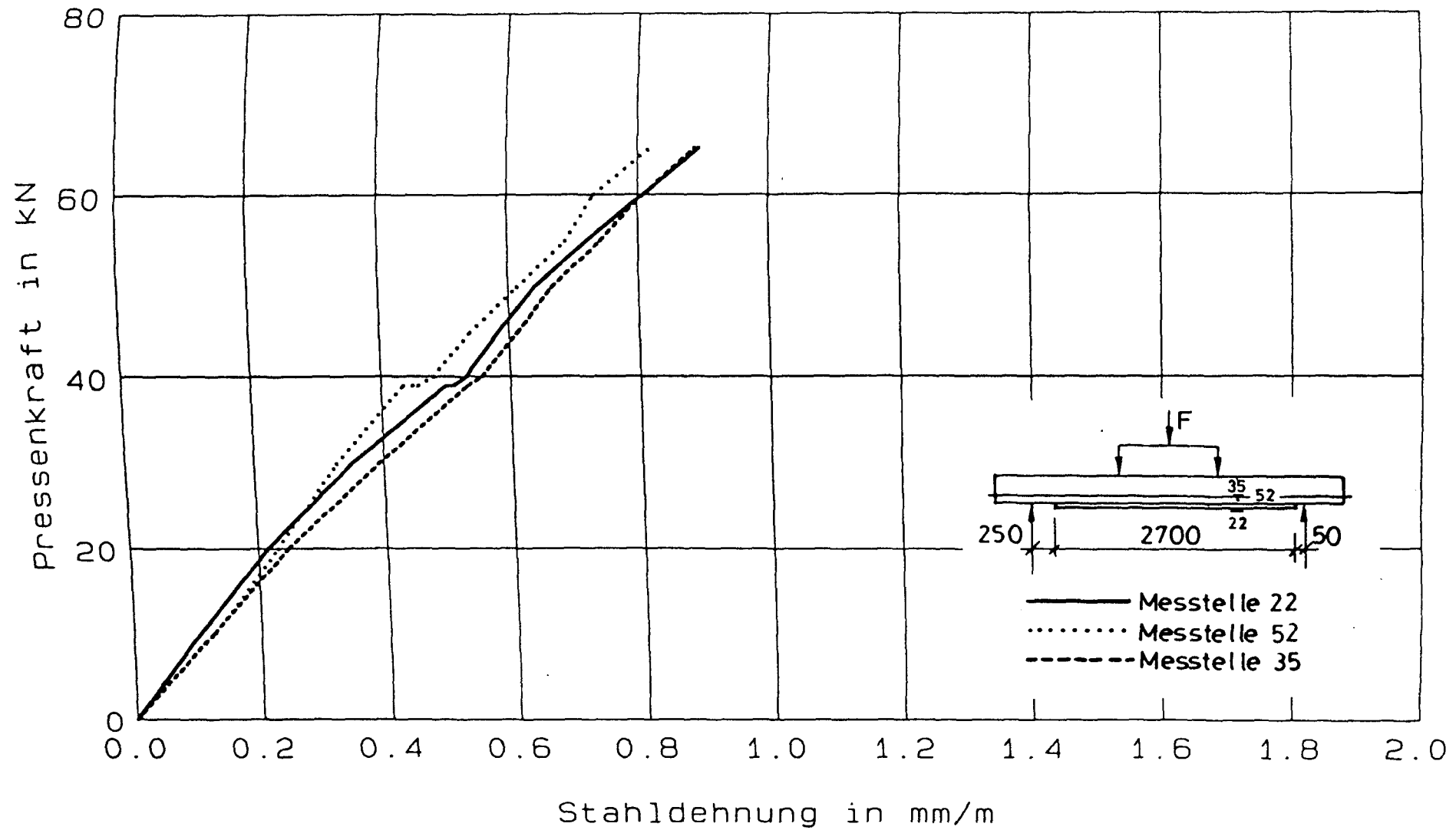


Bild 8.45 : Stahldehnung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB06, LF1

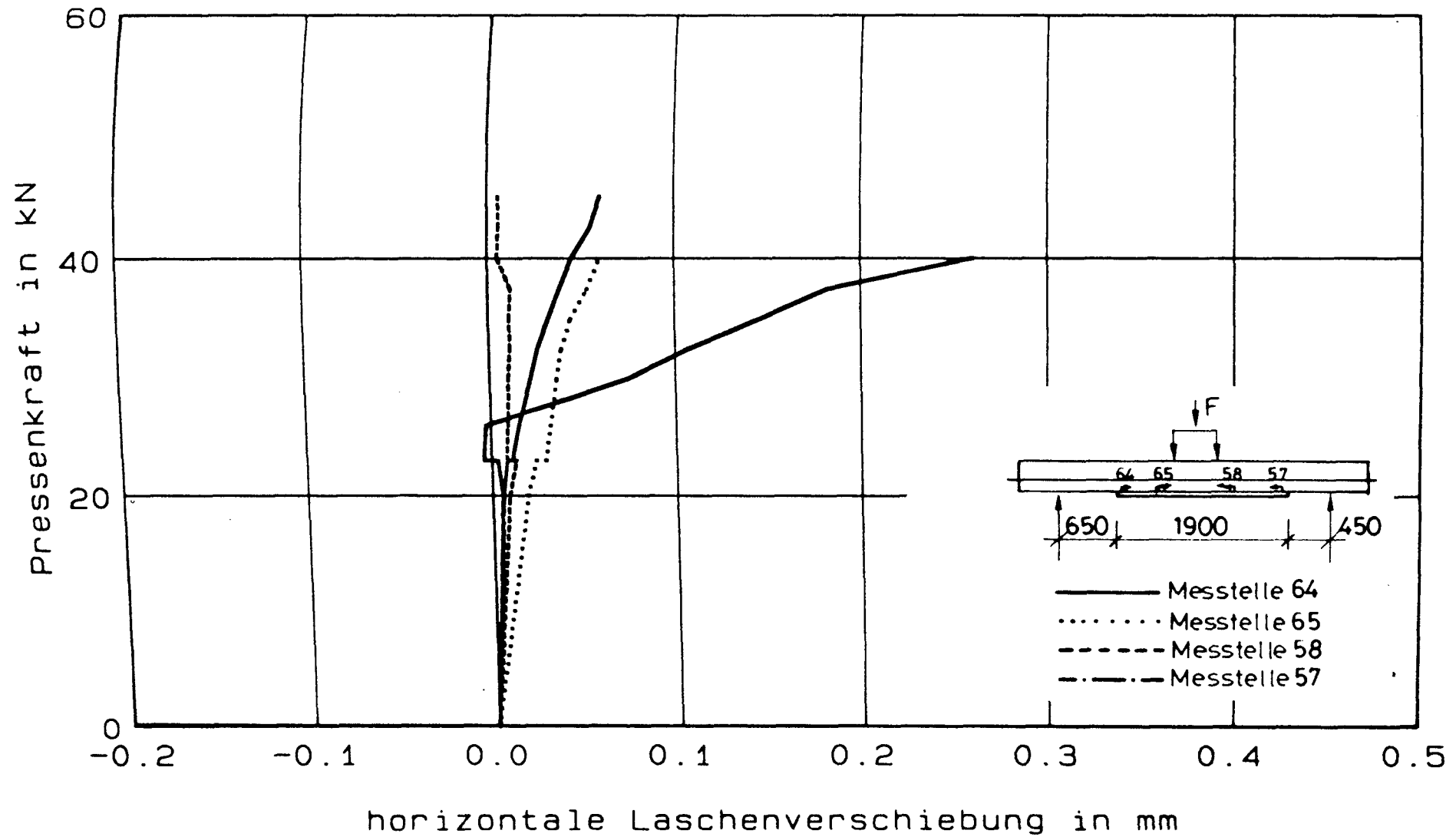


Bild 8.46 : horizontale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB02, LF1

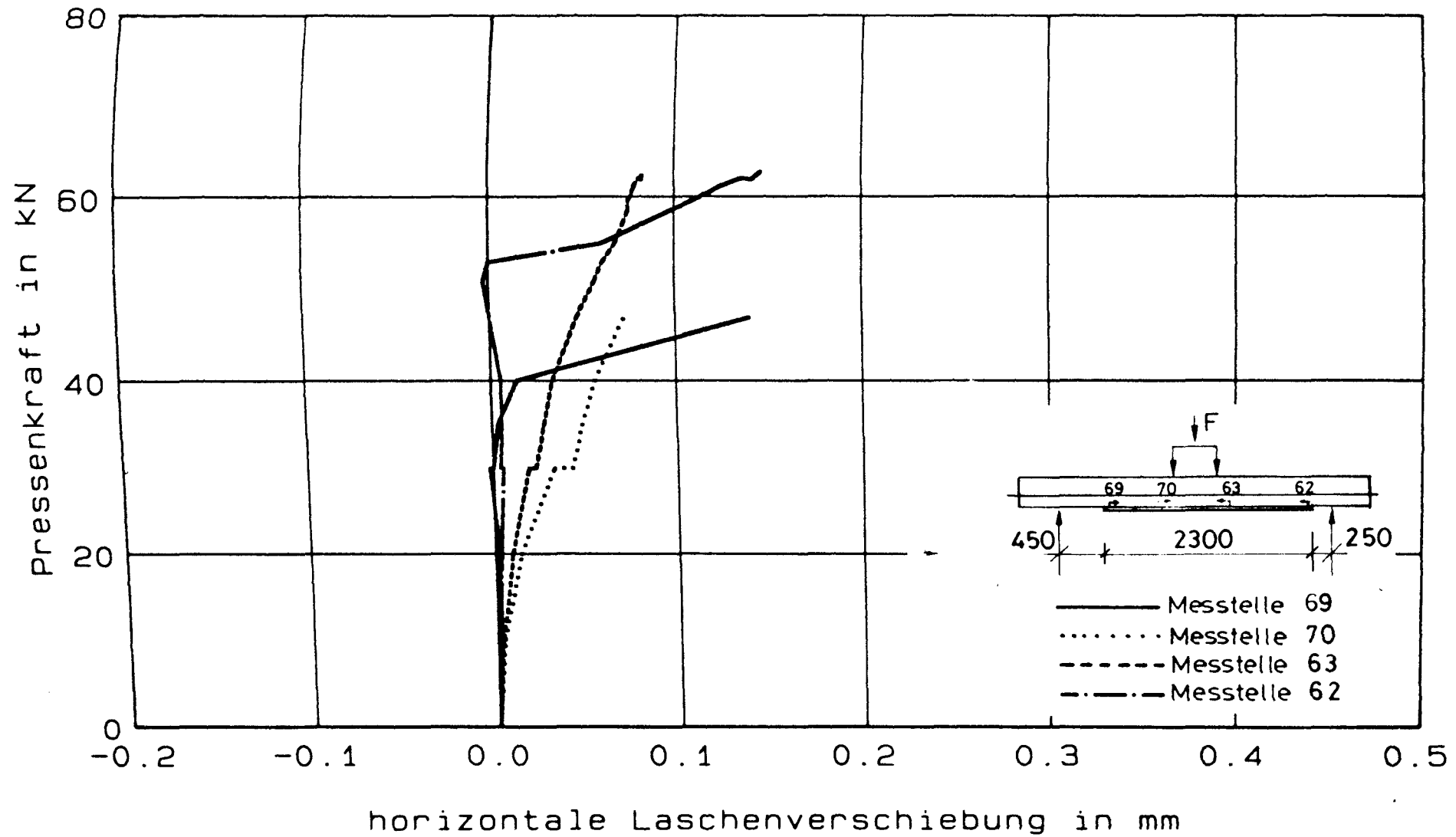


Bild 8.47 : horizontale Laschenverschiebung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB04, LF1

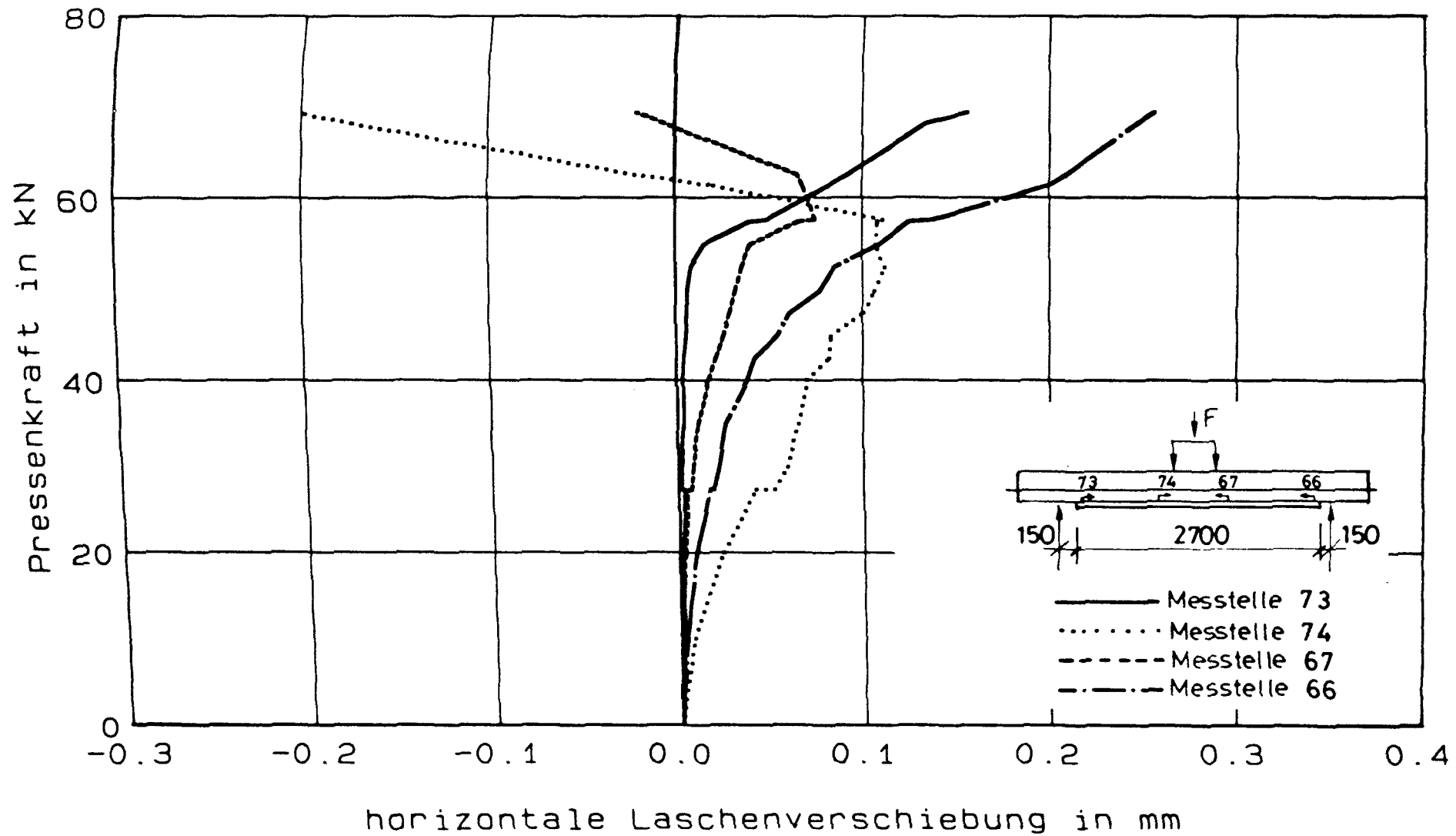


Bild 8.48 : horizontale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB06, LF1

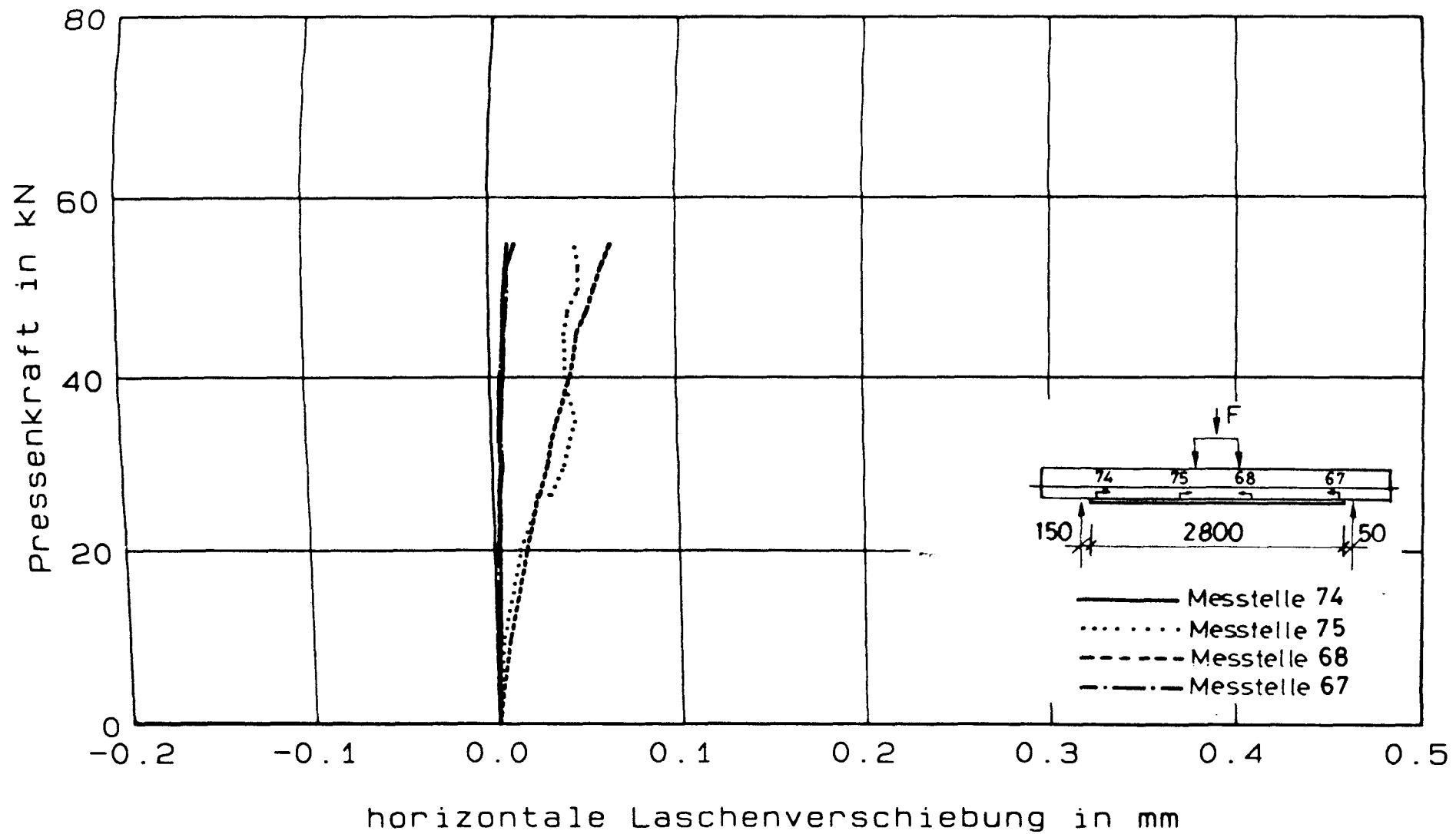


Bild 8.49 : horizontale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB08, LF1

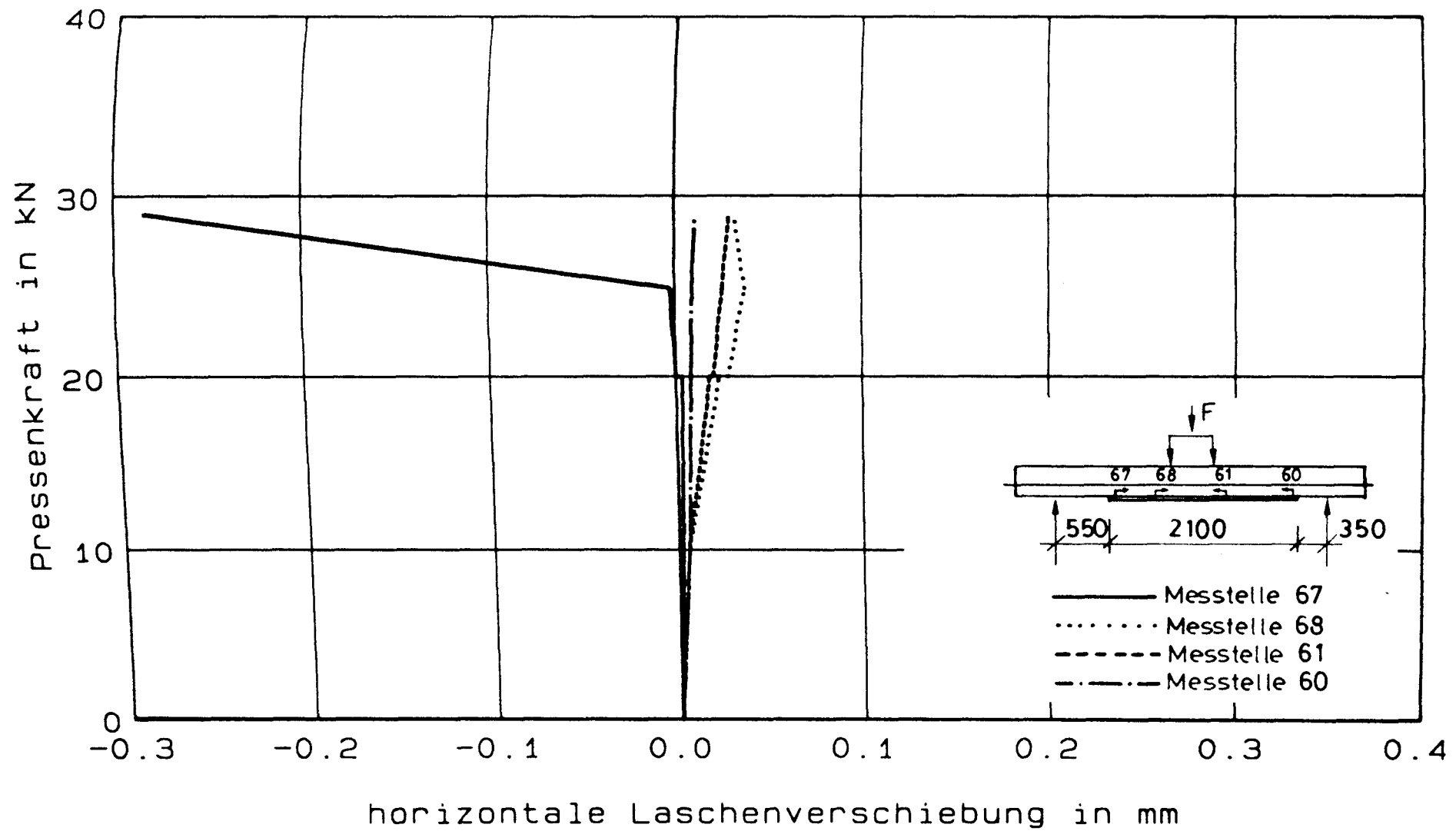


Bild 8.50 : horizontale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB09, LF1

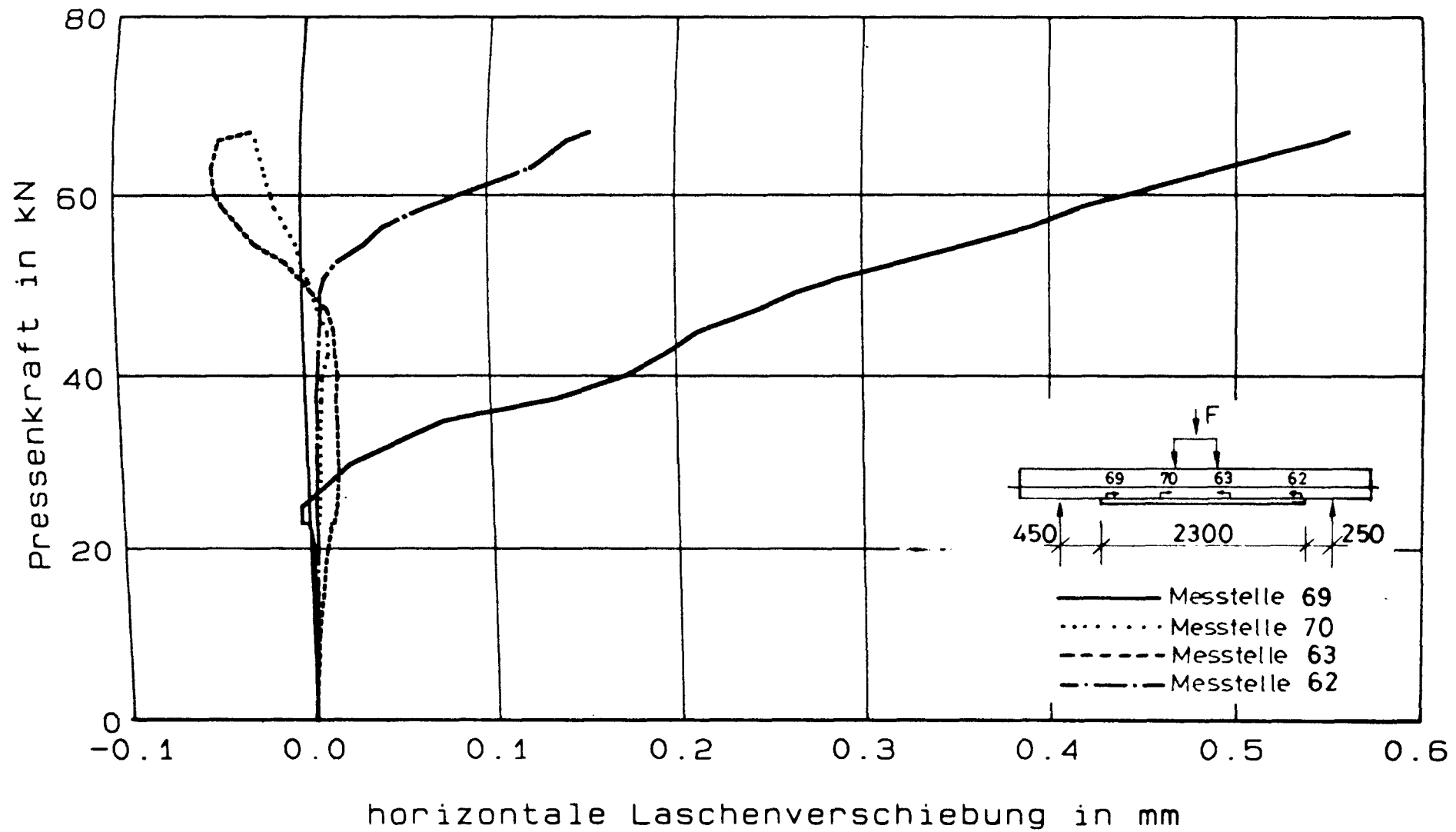


Bild 8.51 : horizontale Laschenverschiebung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB10, LF1

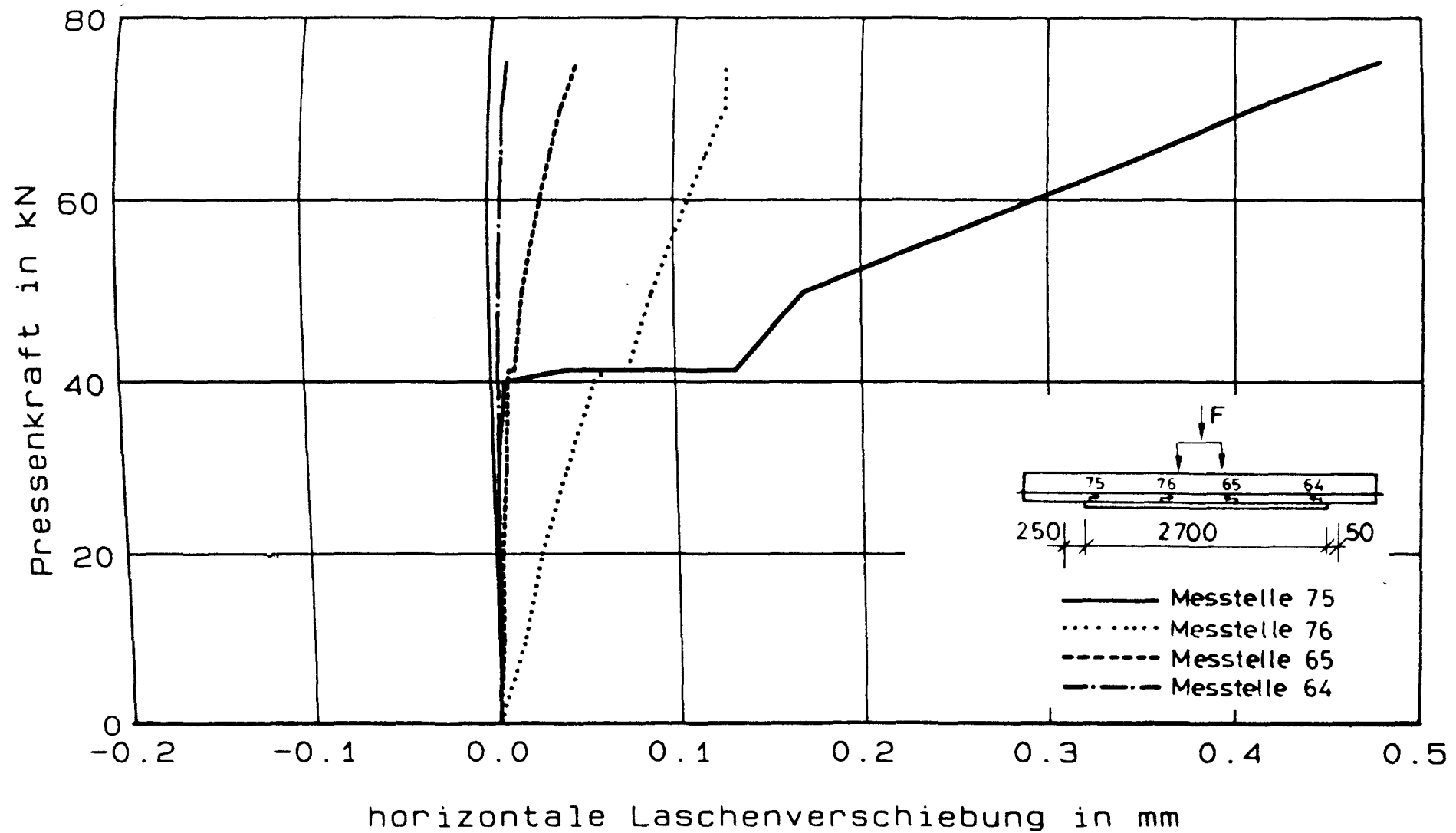


Bild 8.52 : horizontale Laschenverschiebung in Abhängigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB01, LF1

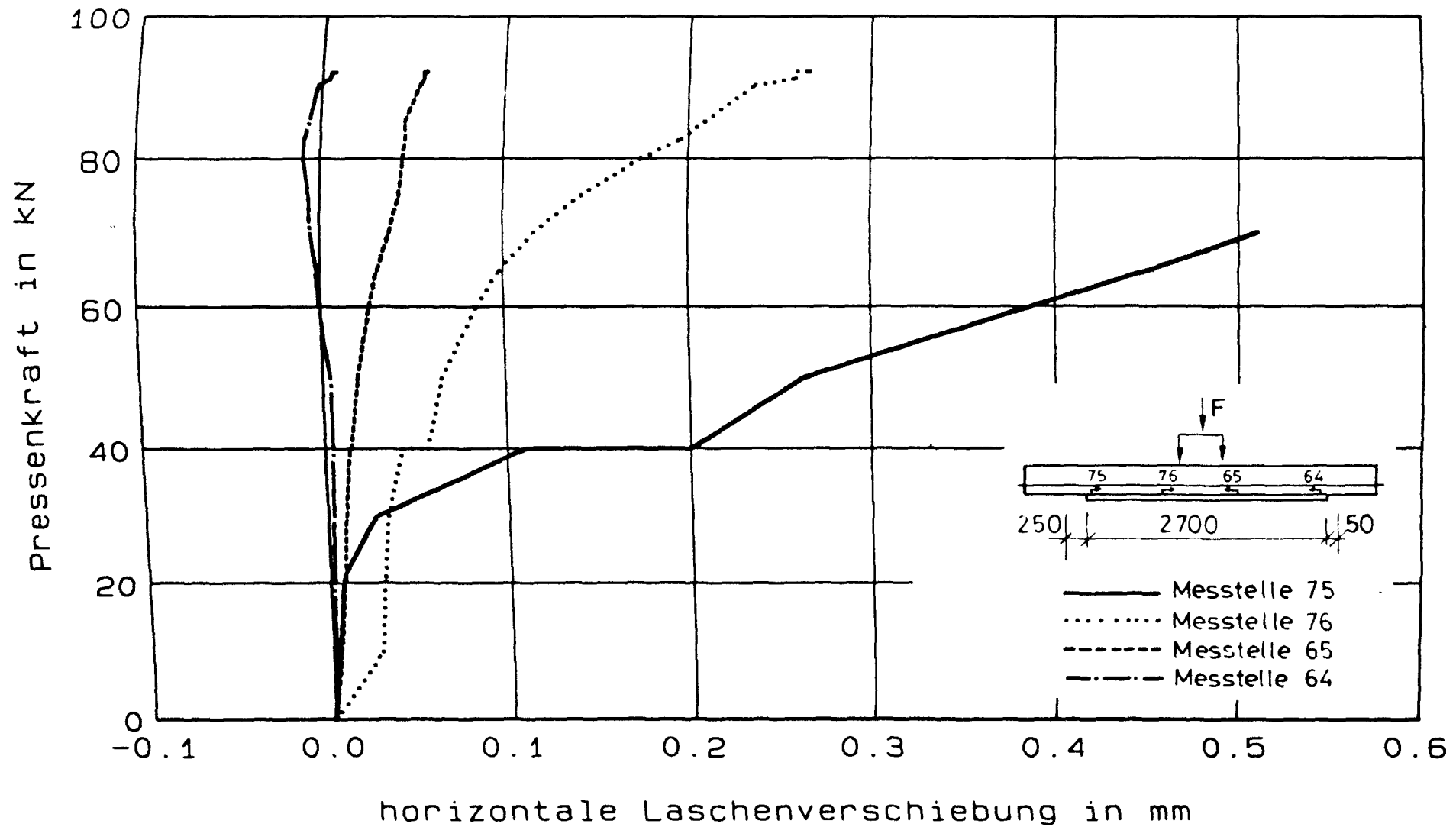


Bild 8.53 : horizontale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB02, LF1

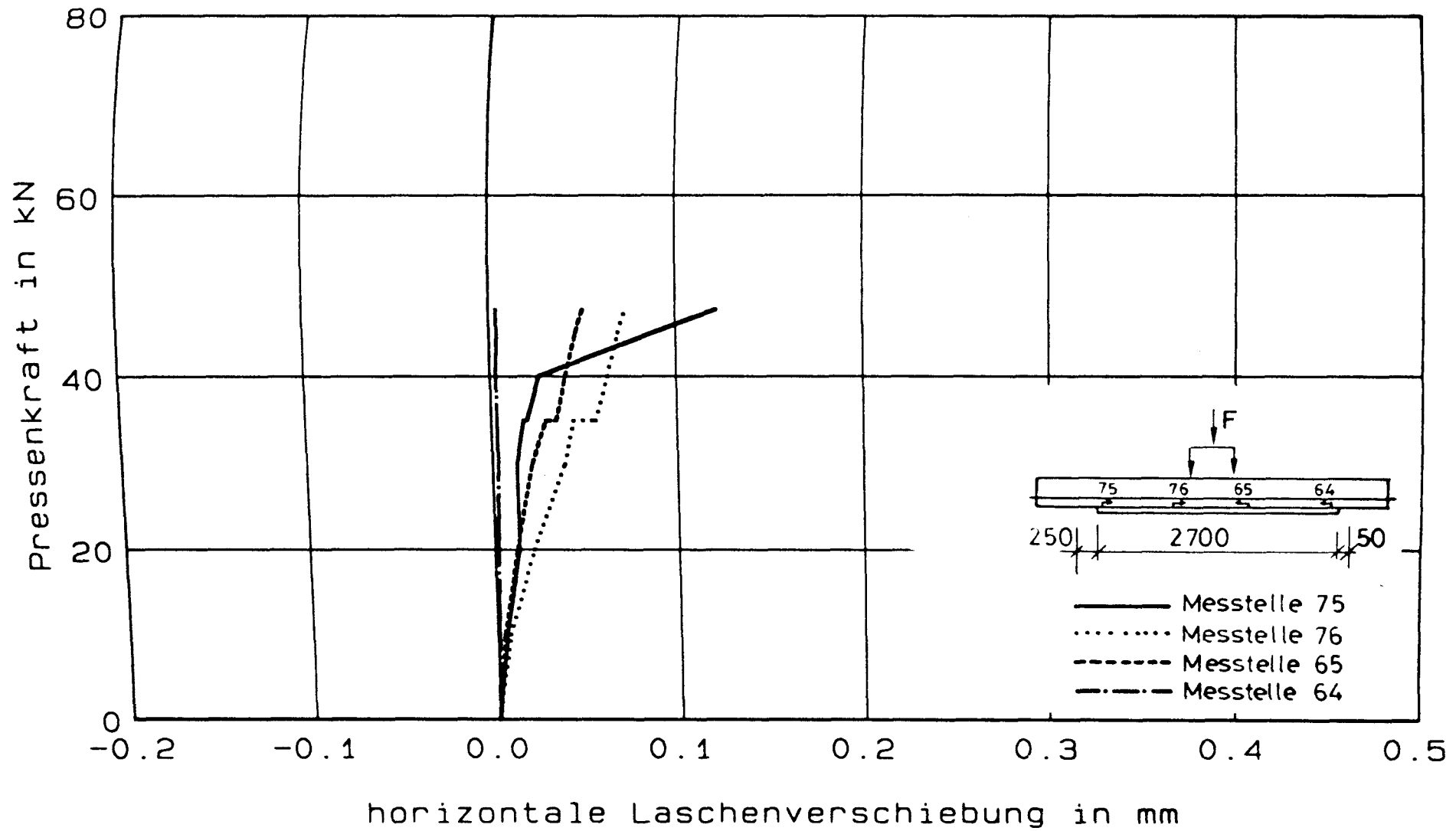


Bild 8.54 : horizontale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB03, LF1

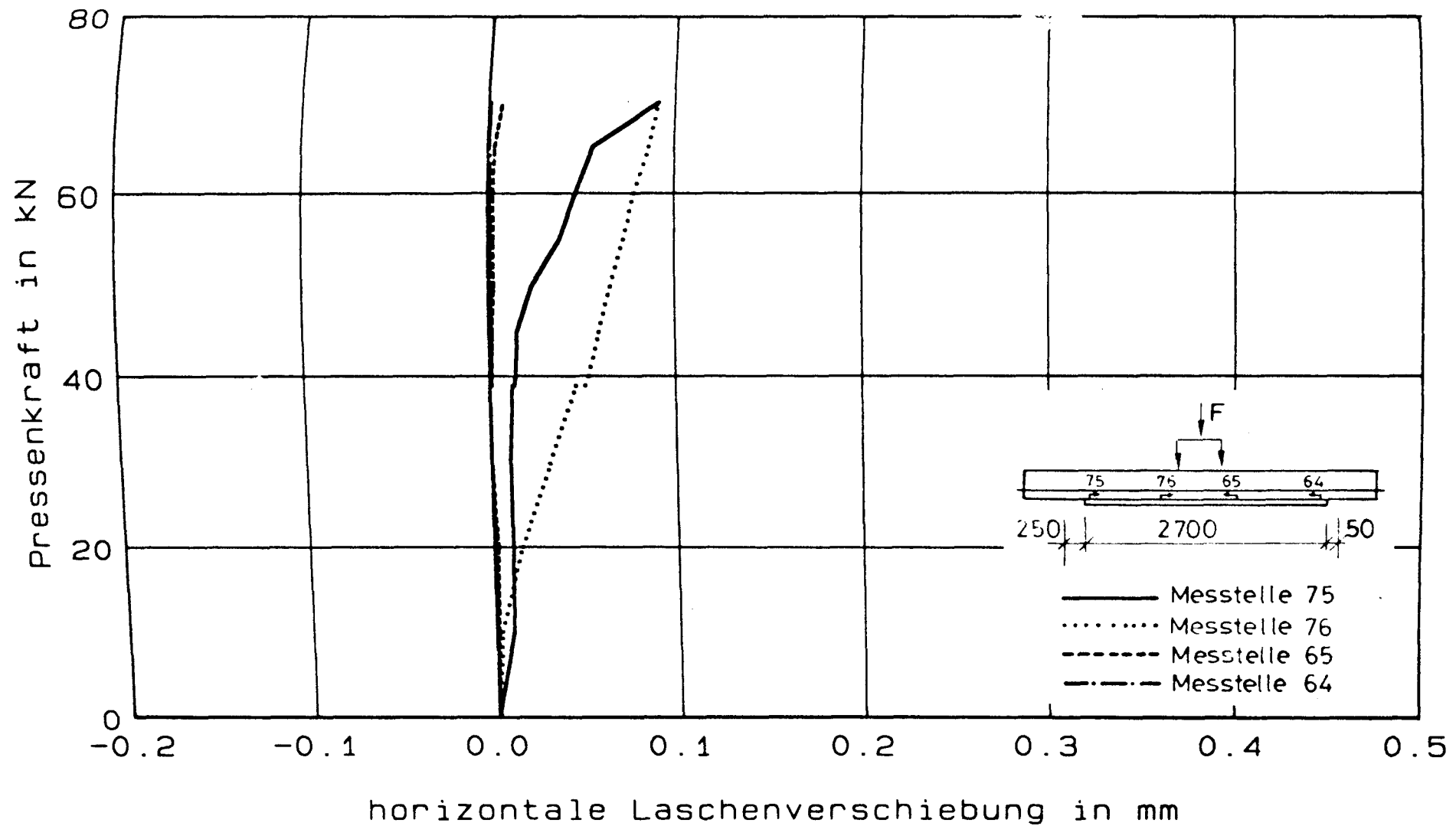


Bild 8.55 : horizontale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB04, LF1

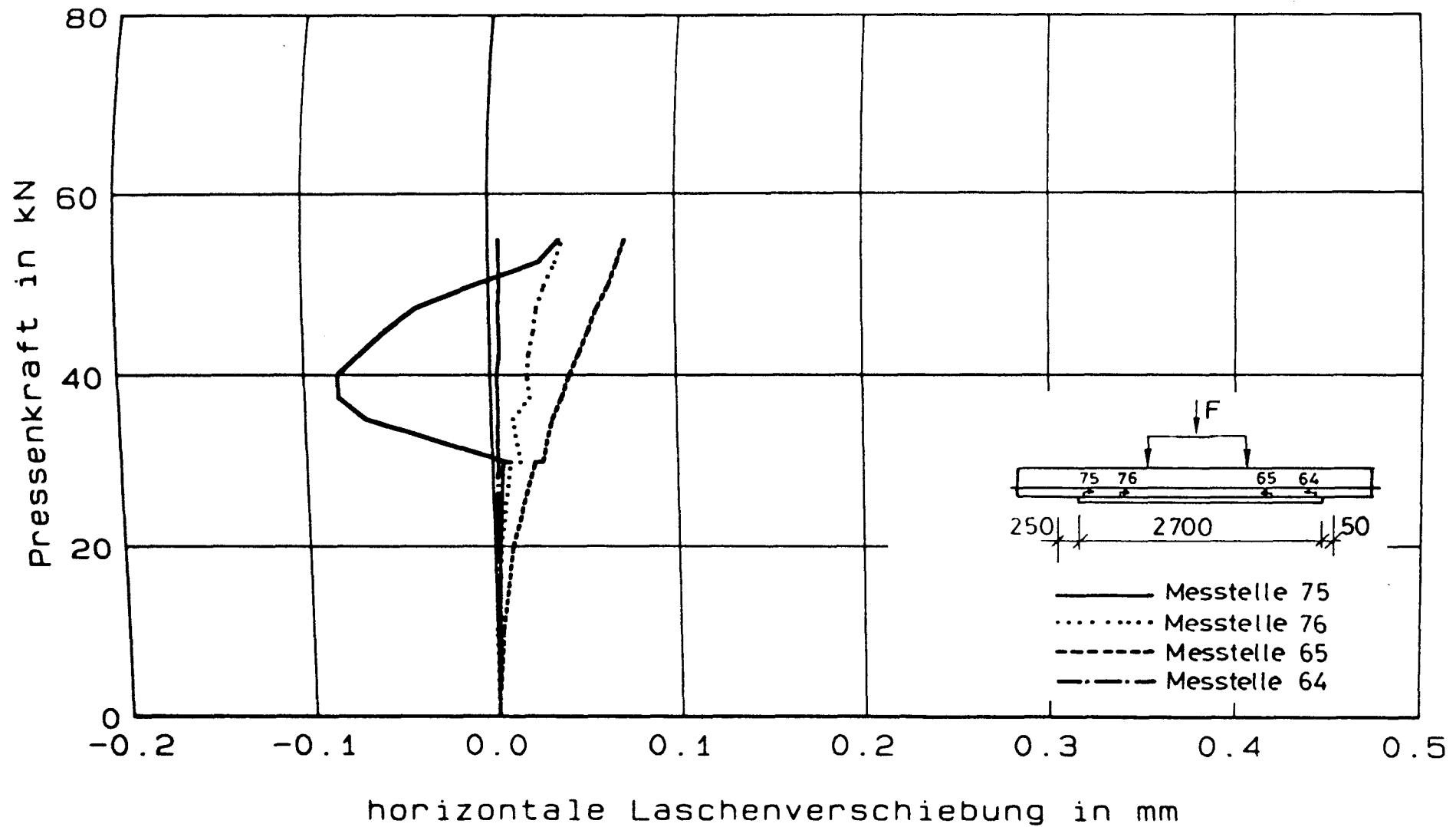


Bild 8.56 : horizontale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB05, LF1

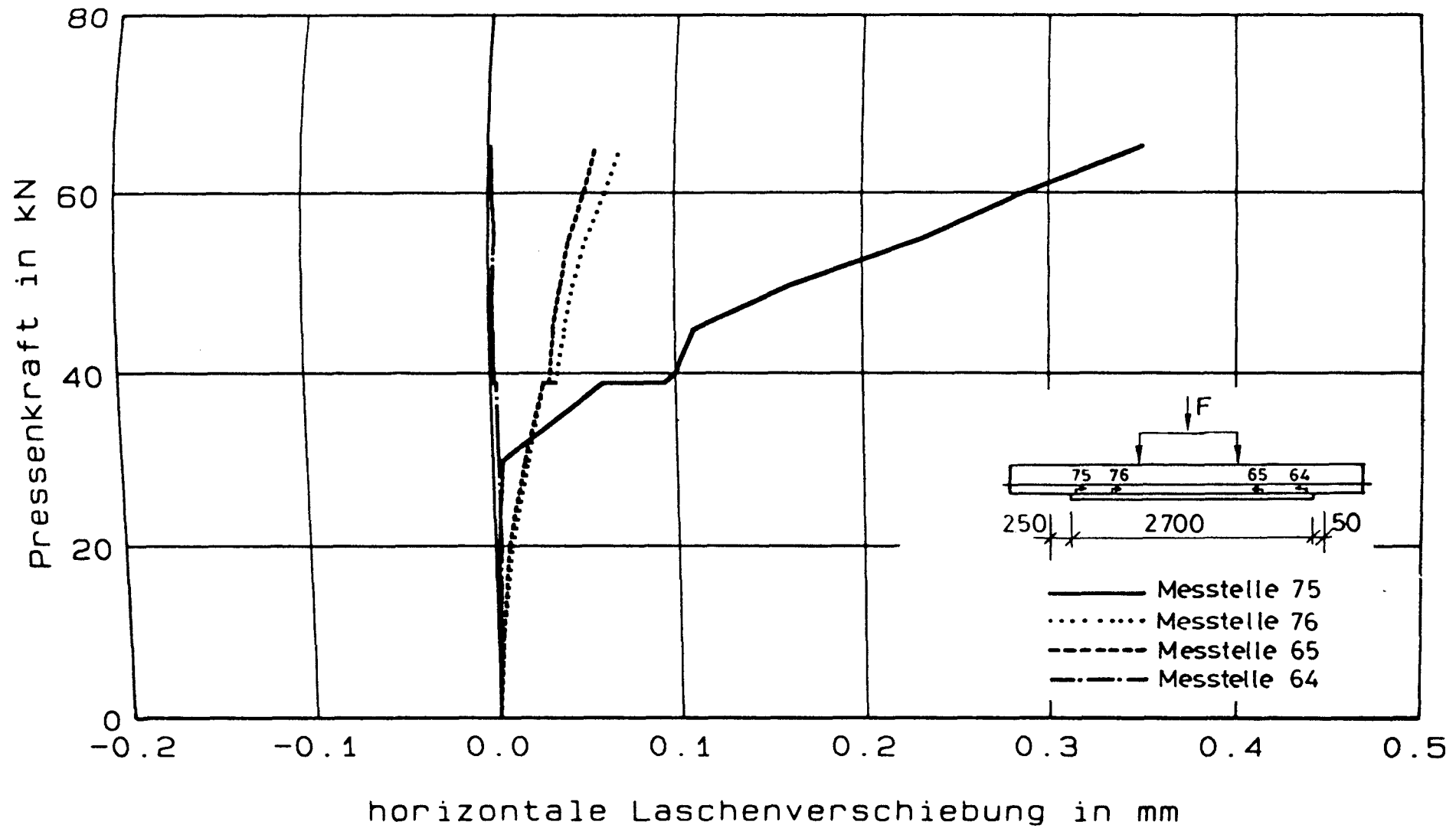


Bild 8.57 : horizontale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB06, LF1

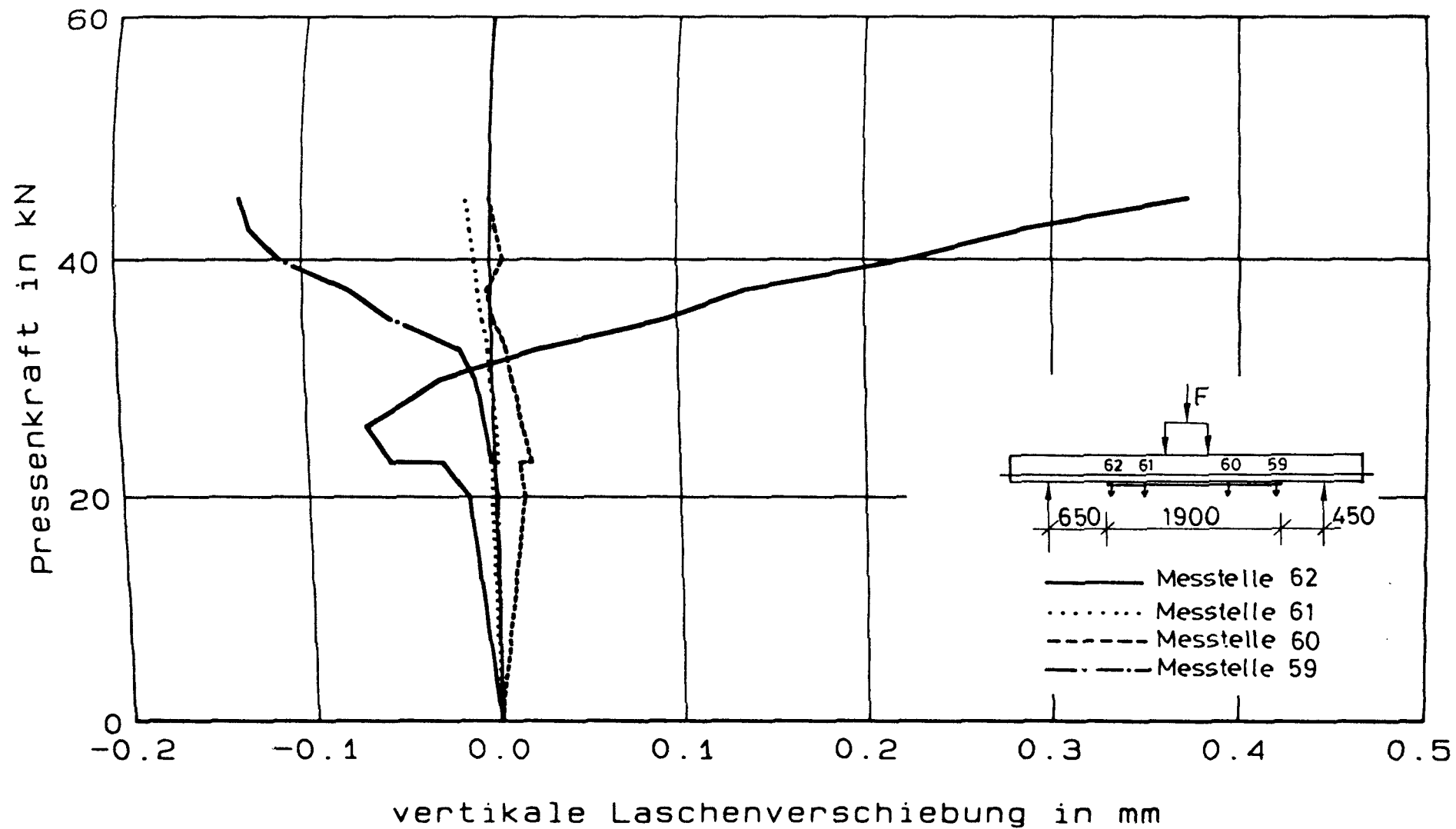


Bild 8.58 : vertikale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB02, LF1

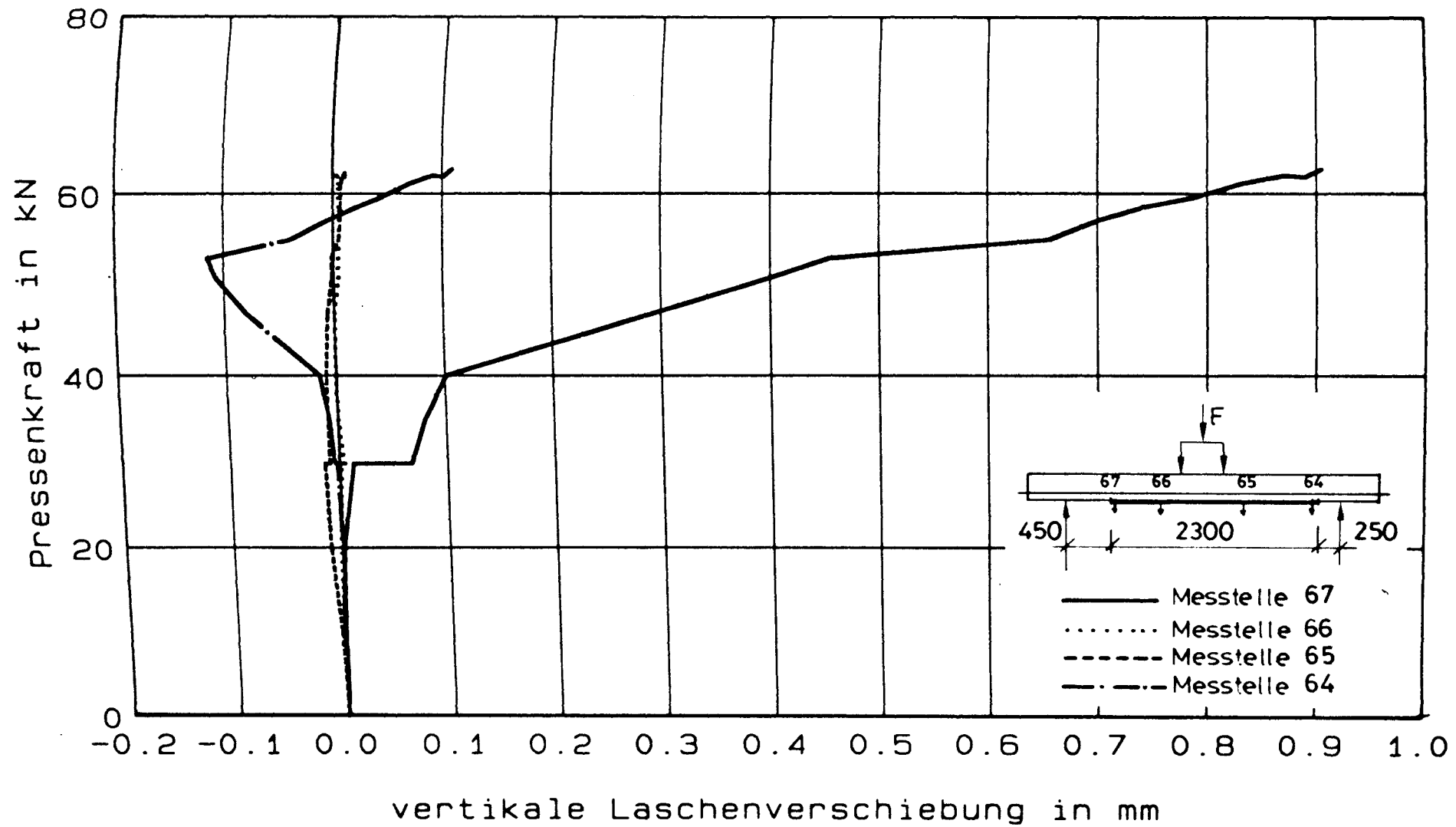


Bild 8.59 : vertikale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
 - Balken DB04, LF1

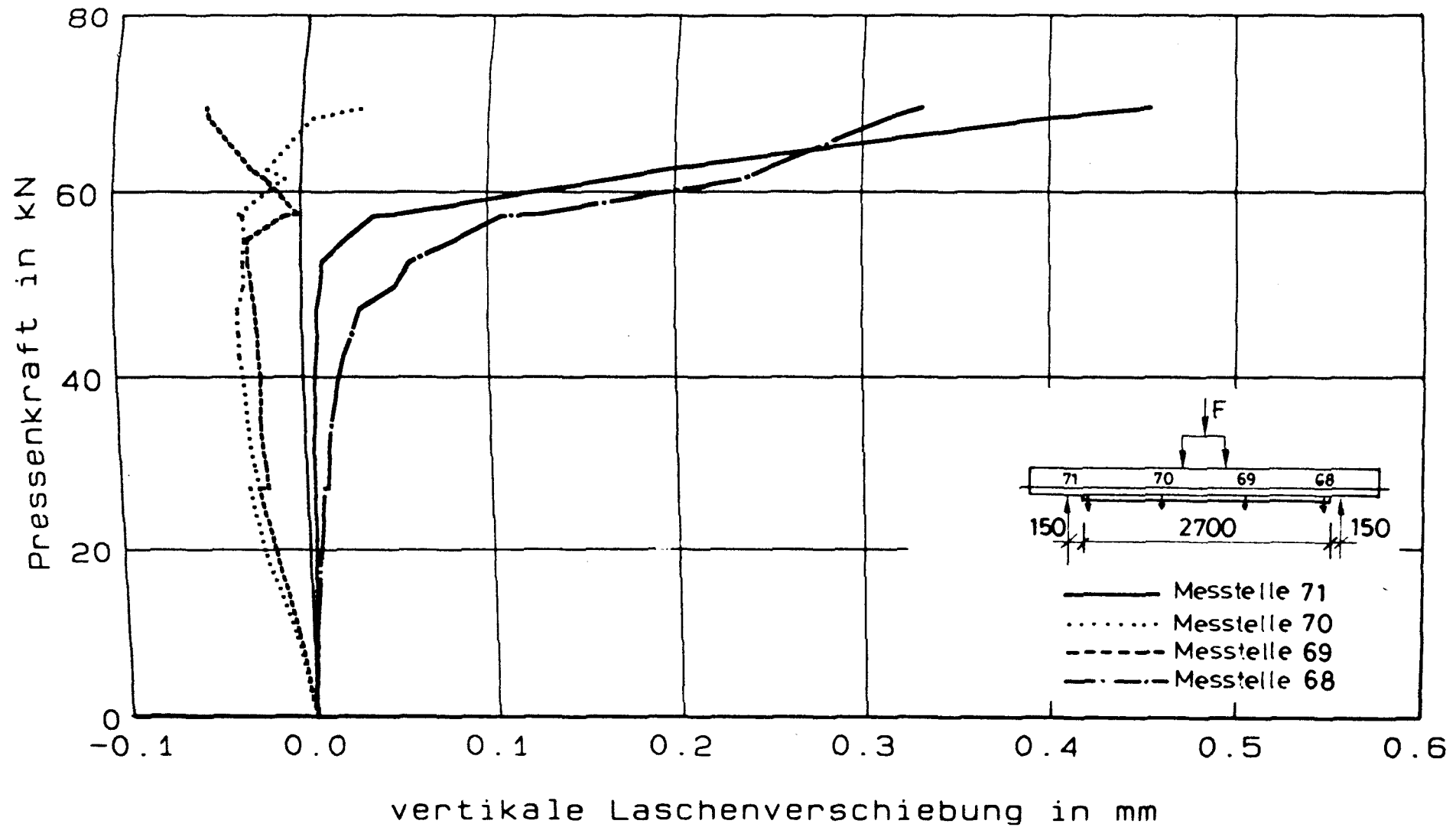


Bild 8.60 : vertikale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB06, LF1

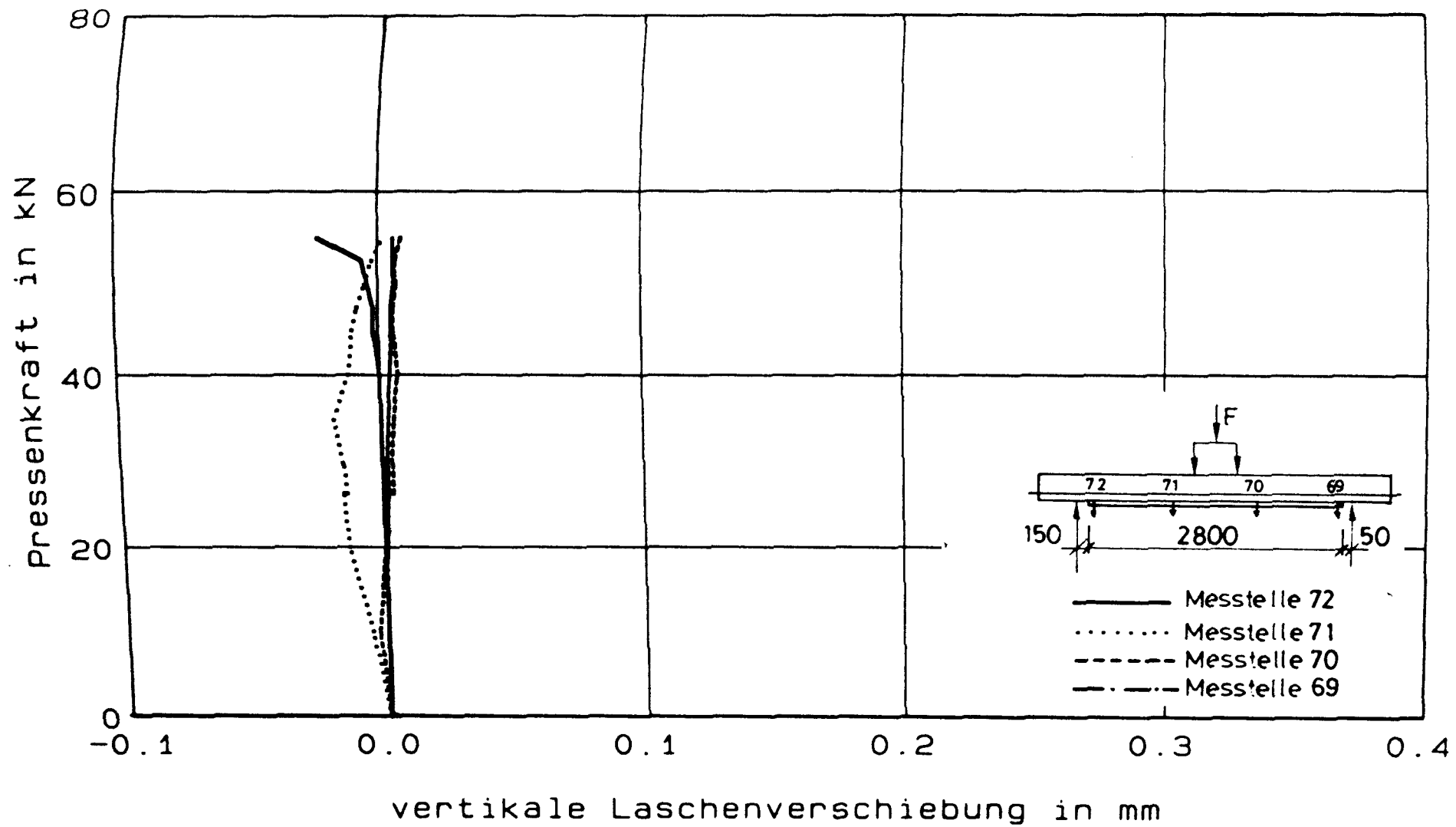


Bild 8.61 : vertikale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB08, LF1

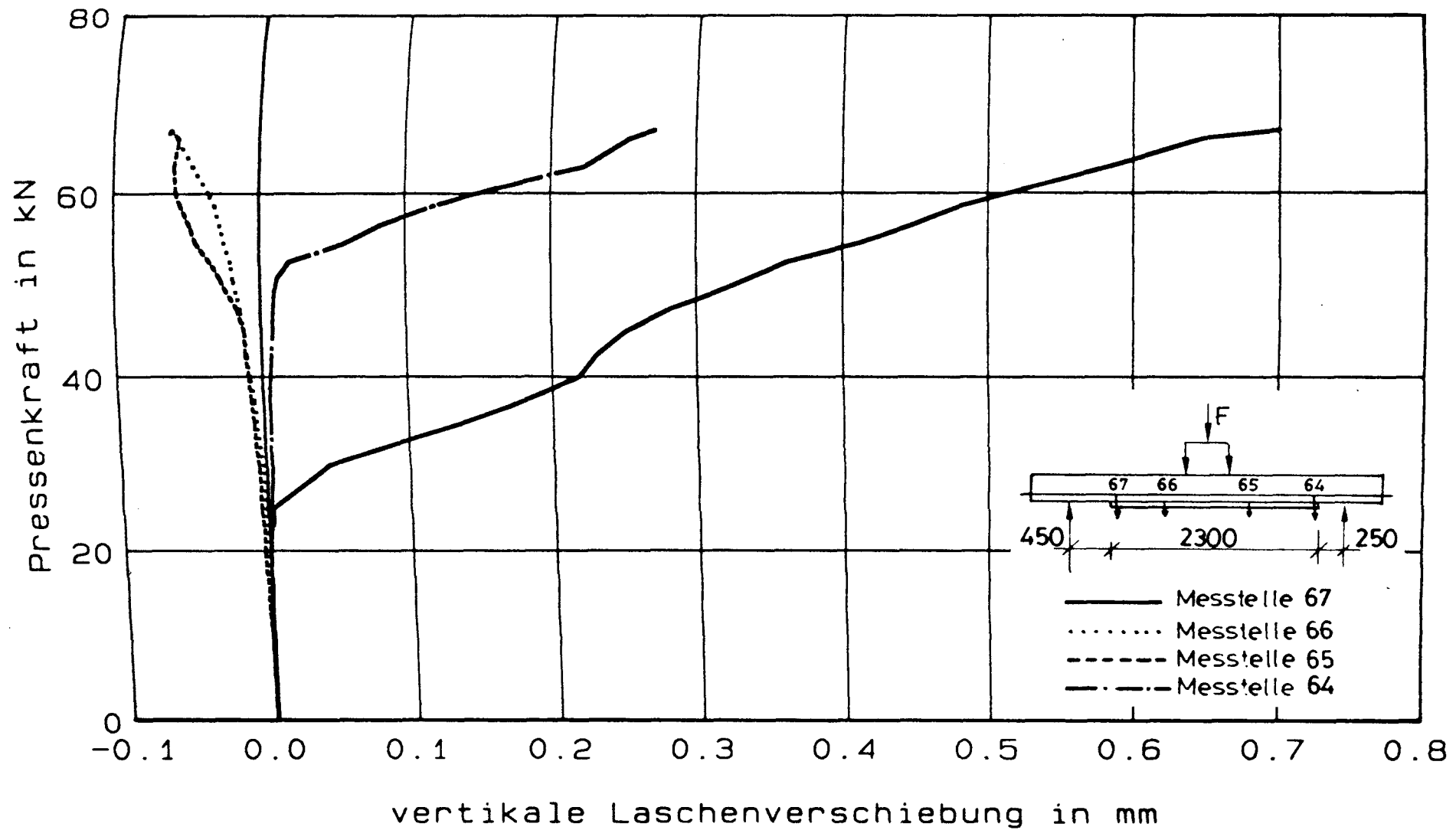


Bild 8.62 : vertikale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken DB10, LF1

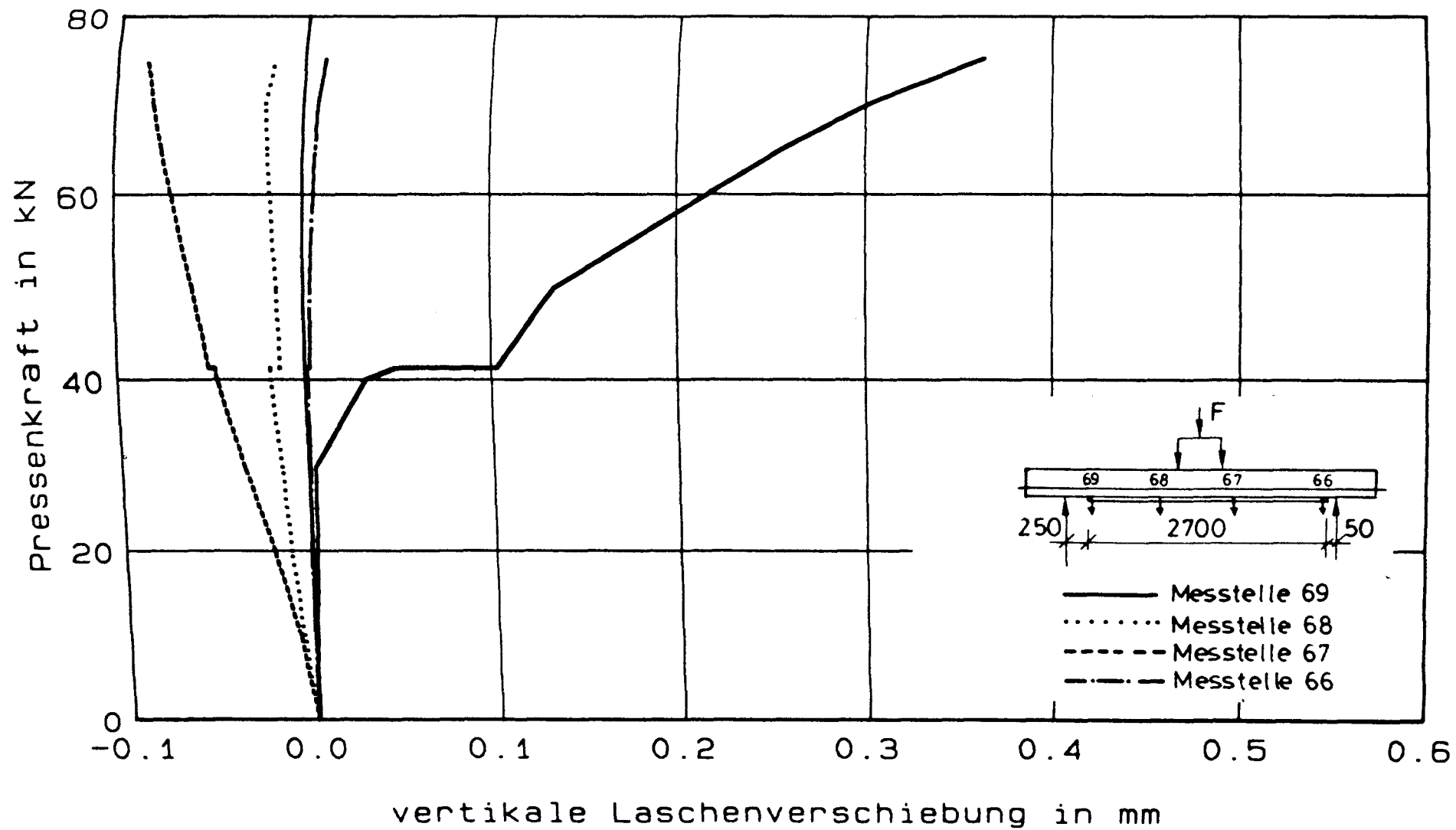


Bild 8.63 : vertikale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB01, LF1

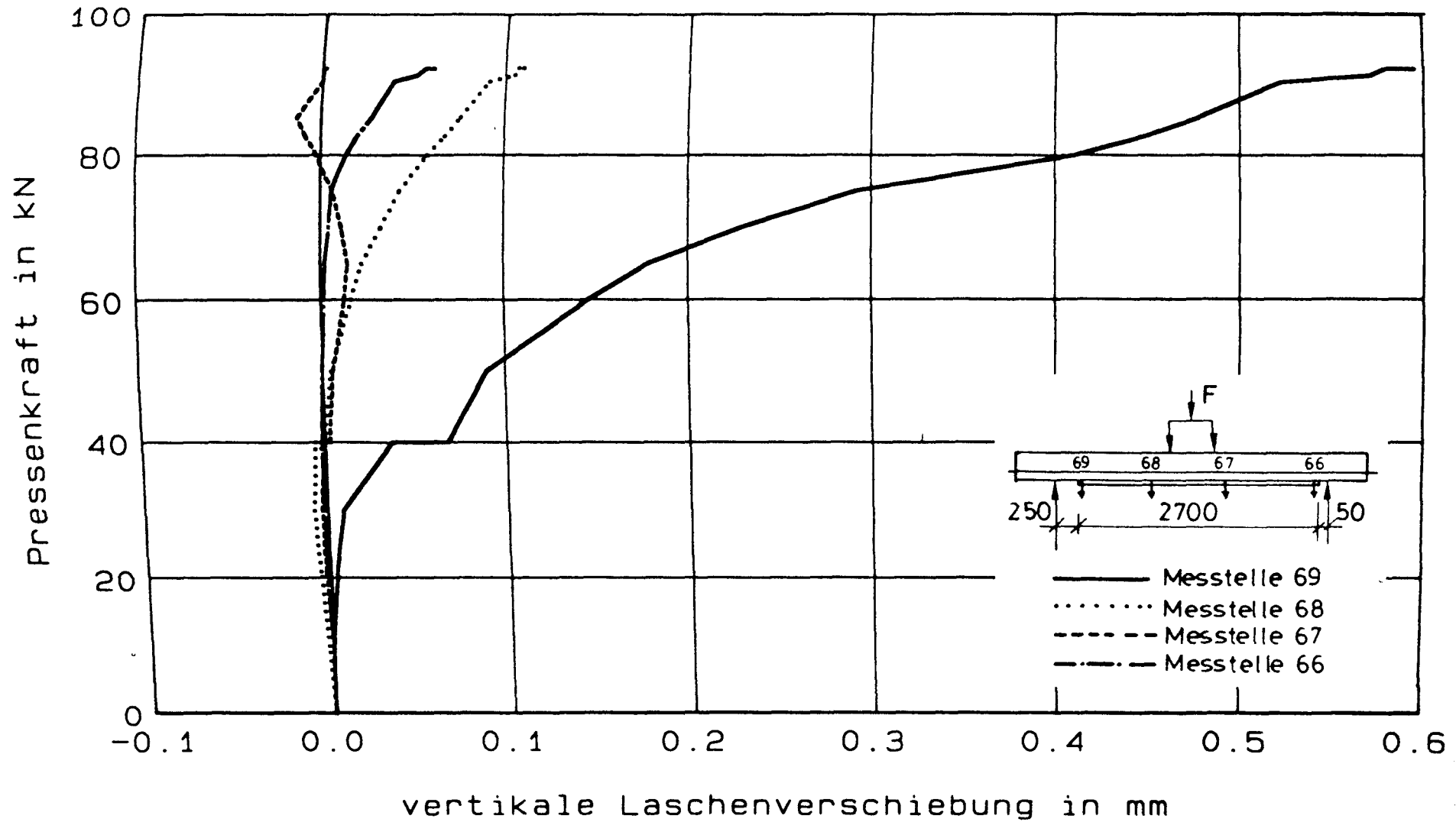


Bild 8.64 : vertikale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB02, LF1

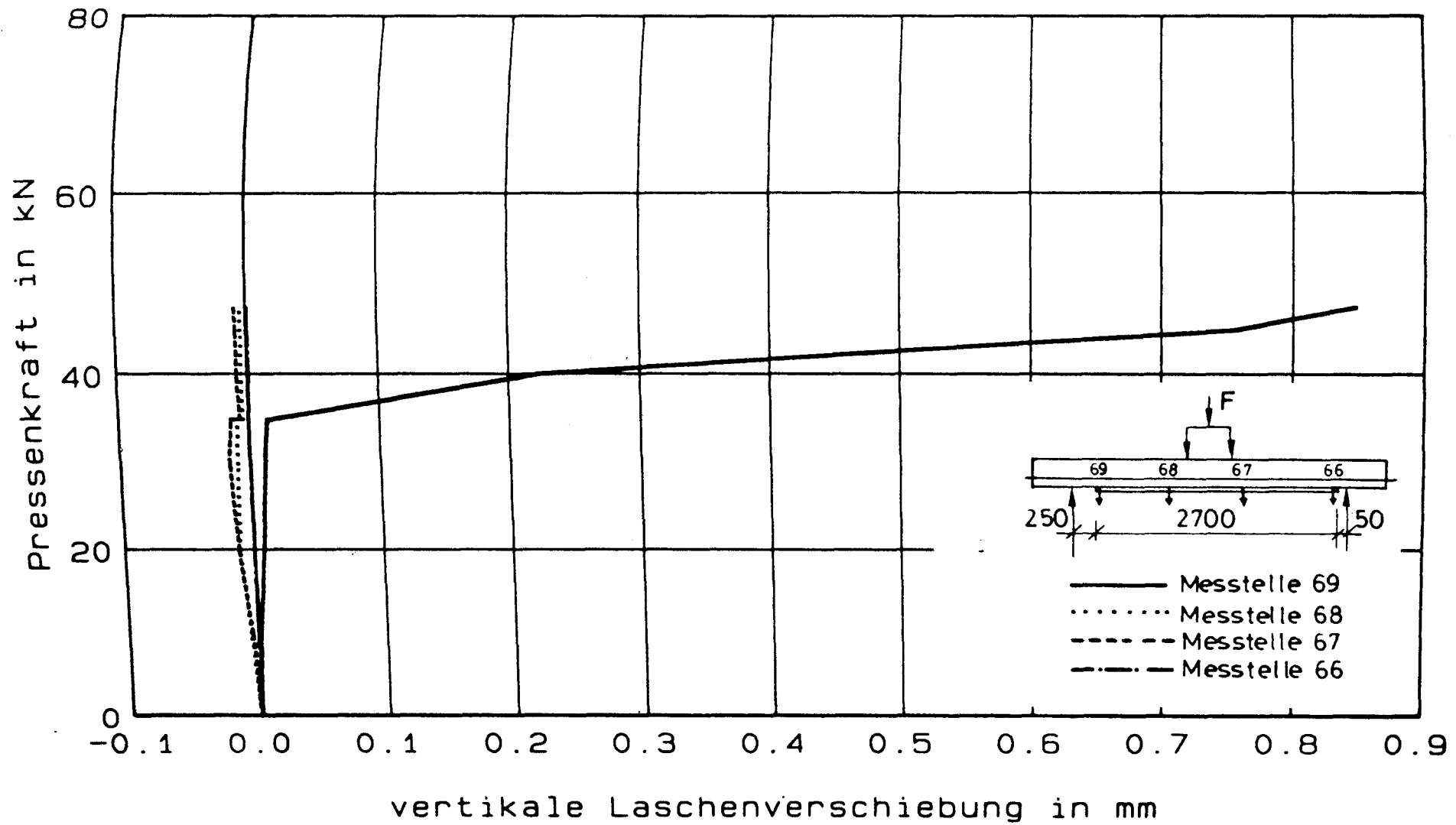


Bild 8.65 : vertikale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB03, LF1

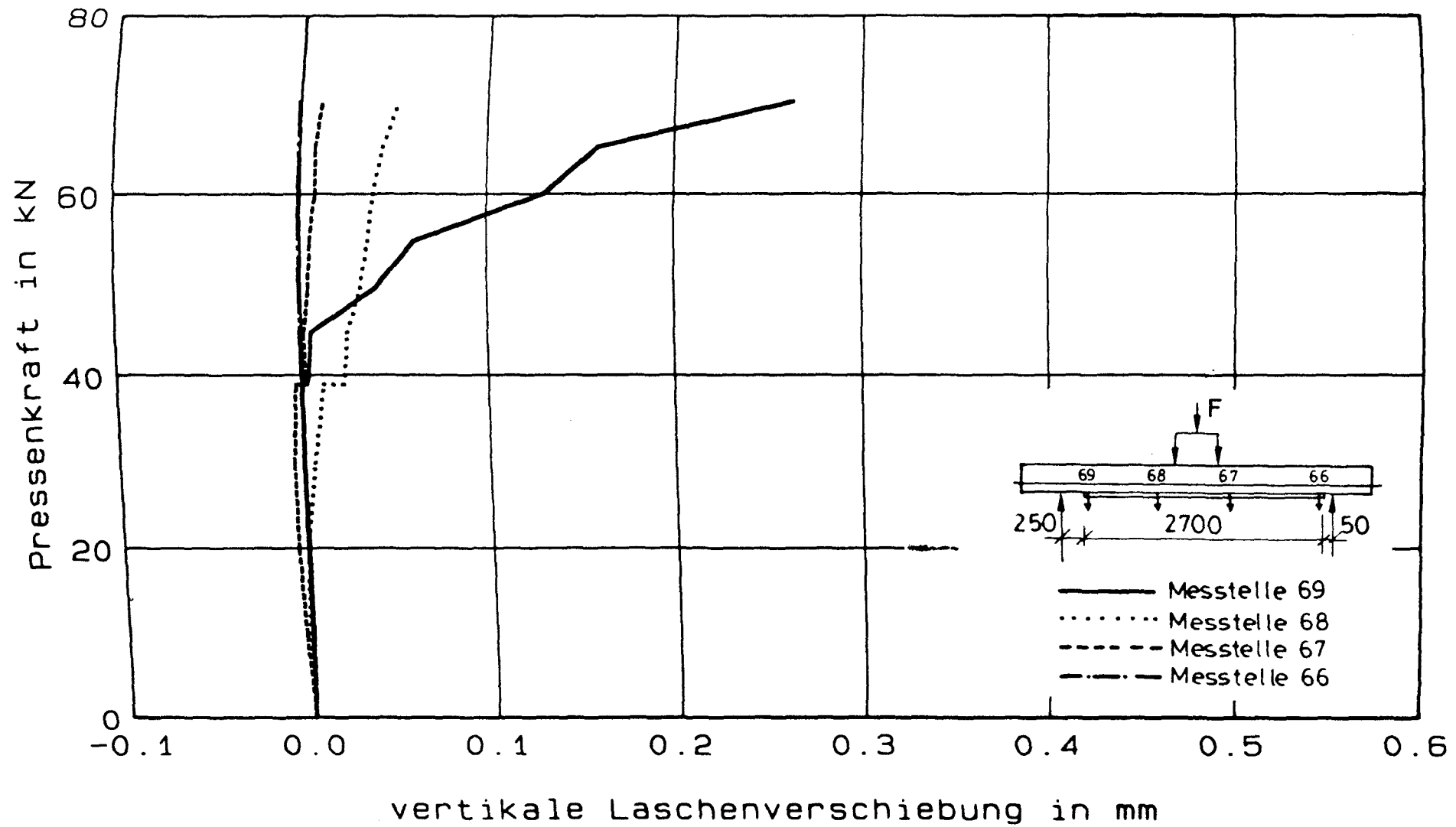


Bild 8.66 : vertikale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB04, LF1

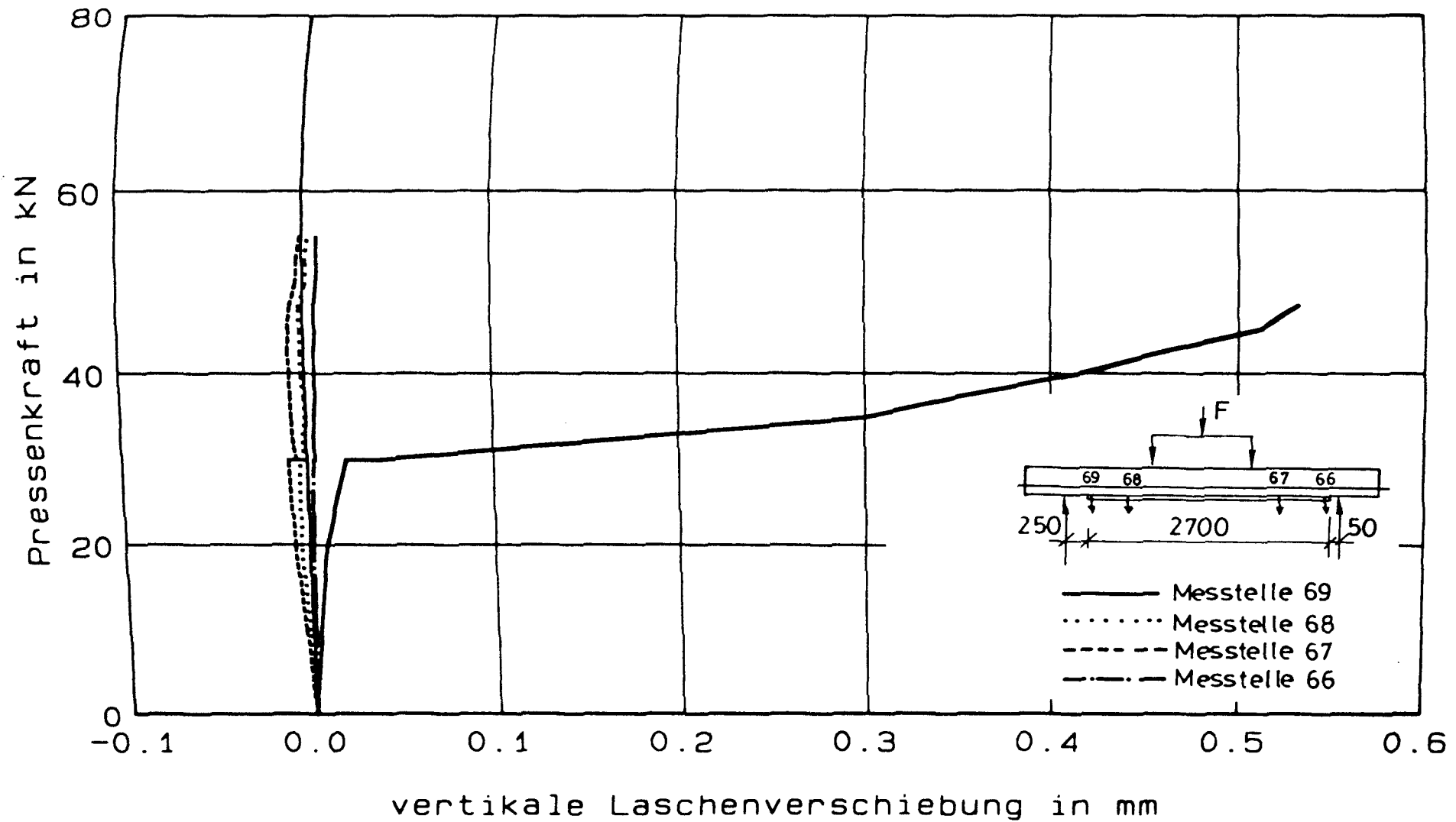


Bild 8.67 : vertikale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB05, LF1

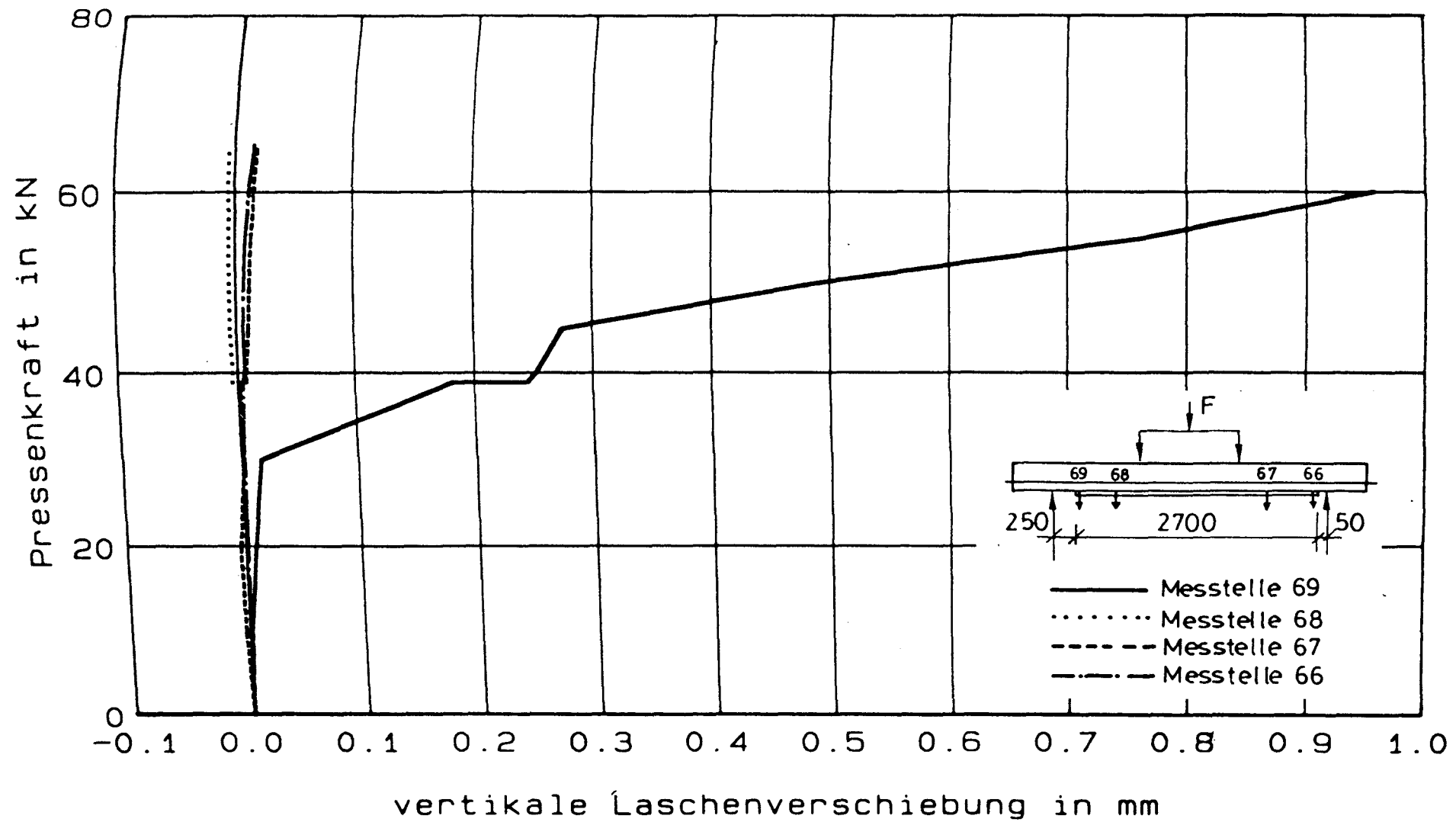


Bild 8.68 : vertikale Laschenverschiebung in Abhaengigkeit von der Pressenkraft
- Balken SB06, LF1

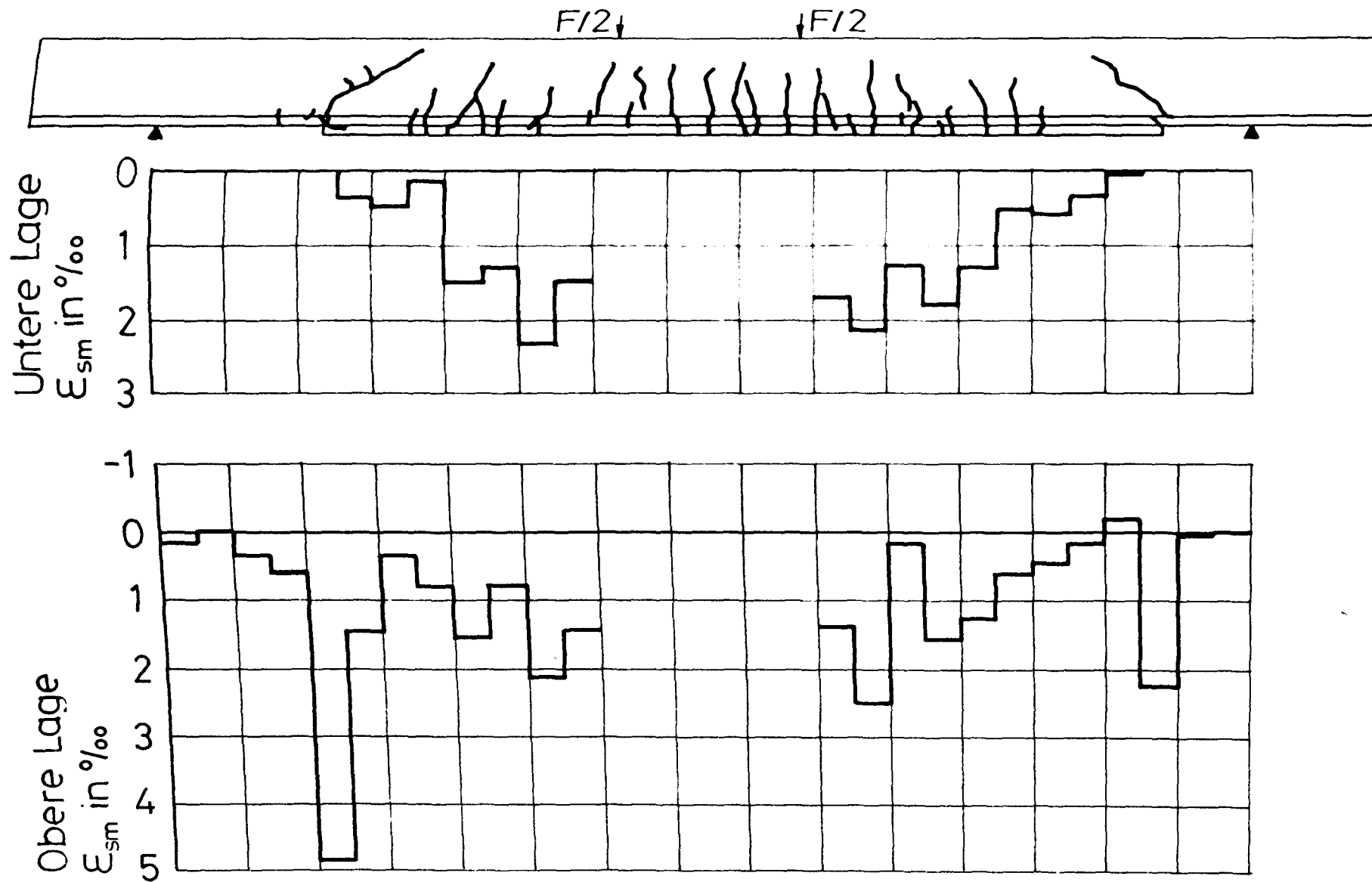


Bild 8.69 : mittlere Stahldehnung ϵ_{sm} und Laschendehnung ϵ_l bei LS 23, $F=55$ kN
- Balken DB01, LF1

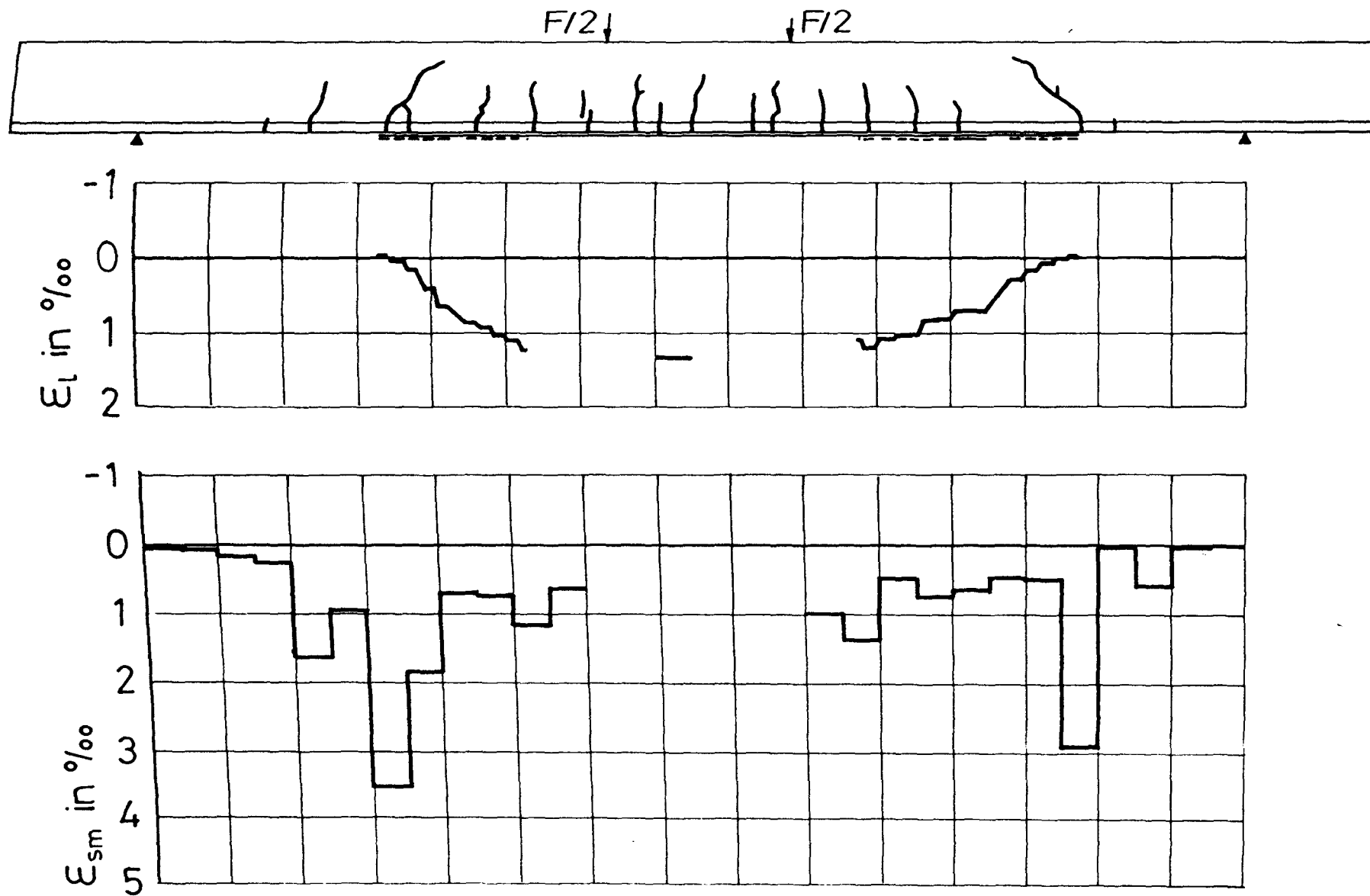


Bild 8.70 : mittlere Stahldehnung ϵ_{sm} und Laschendehnung ϵ_l bei LS 16, $F=45$ kN
- Balken DB02, LF1

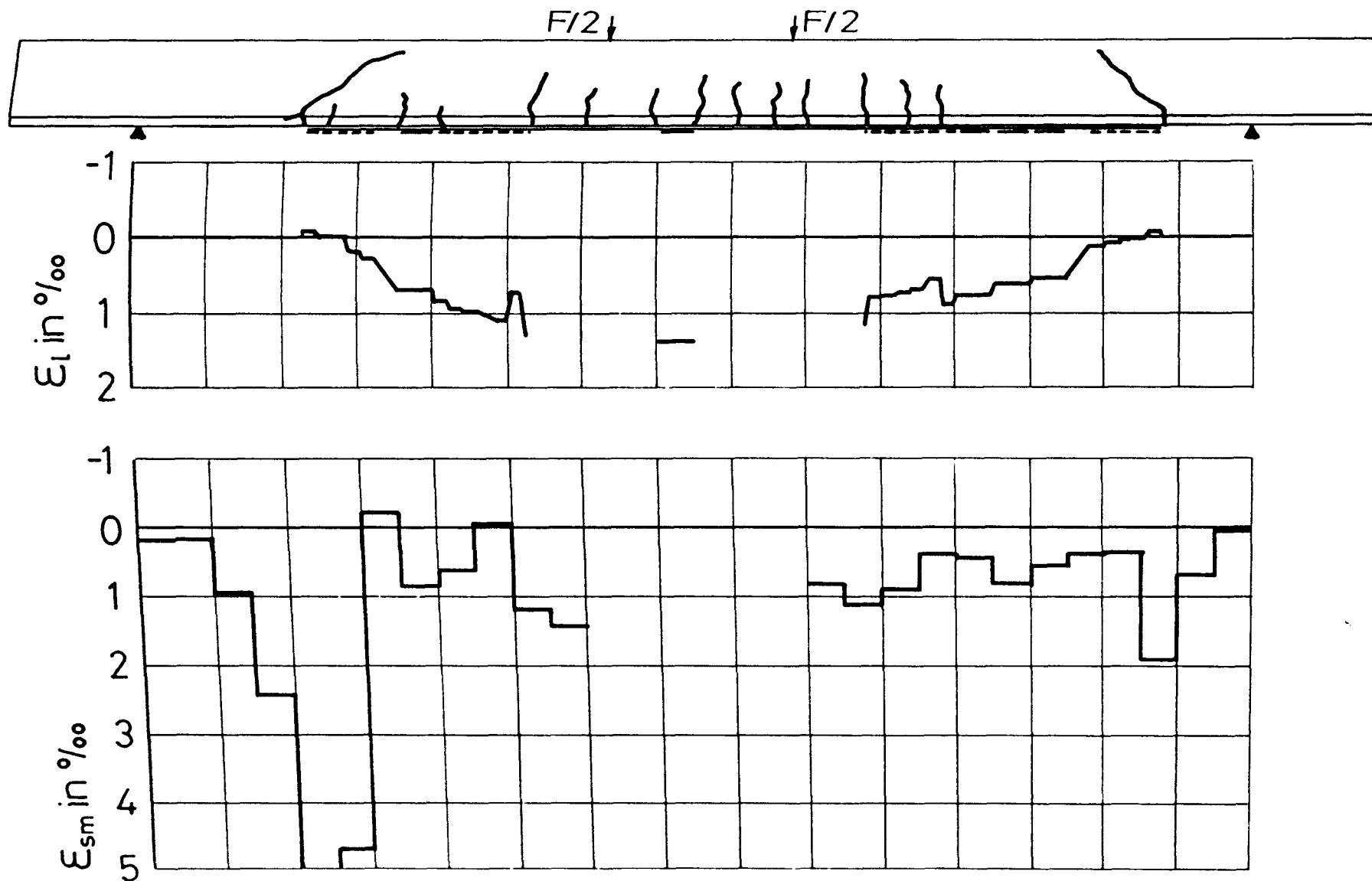


Bild 8.71 : mittlere Stahldehnung ϵ_{sm} und Laschendehnung ϵ_l bei LS 30, $F=62.7$ kN
 - Balken DB04, LF1

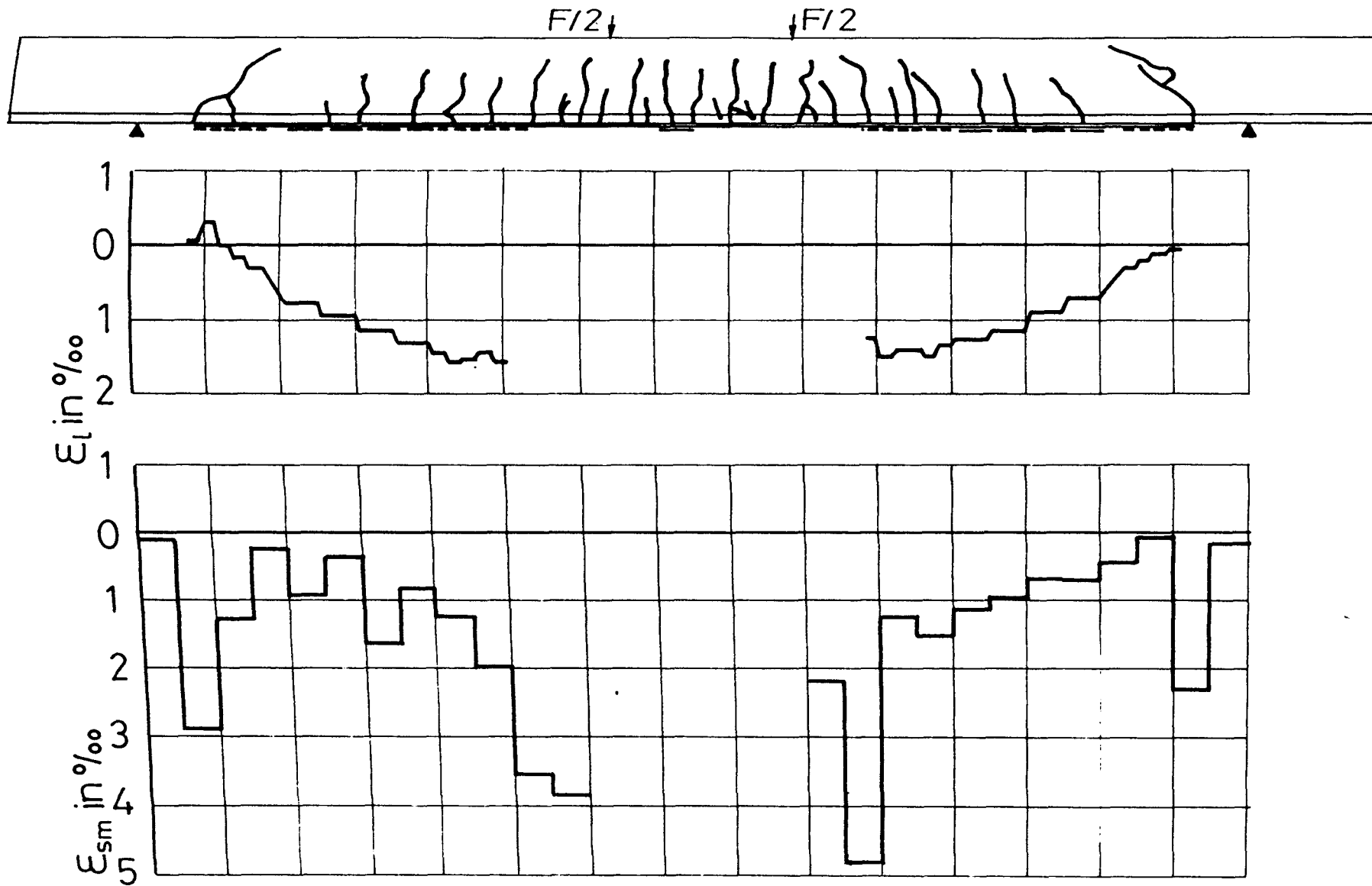


Bild 8.72 : mittlere Stahldehnung ϵ_{sm} und Laschendehnung ϵ_l bei LS 44, $F=69$ kN
- Balken DB06, LF1

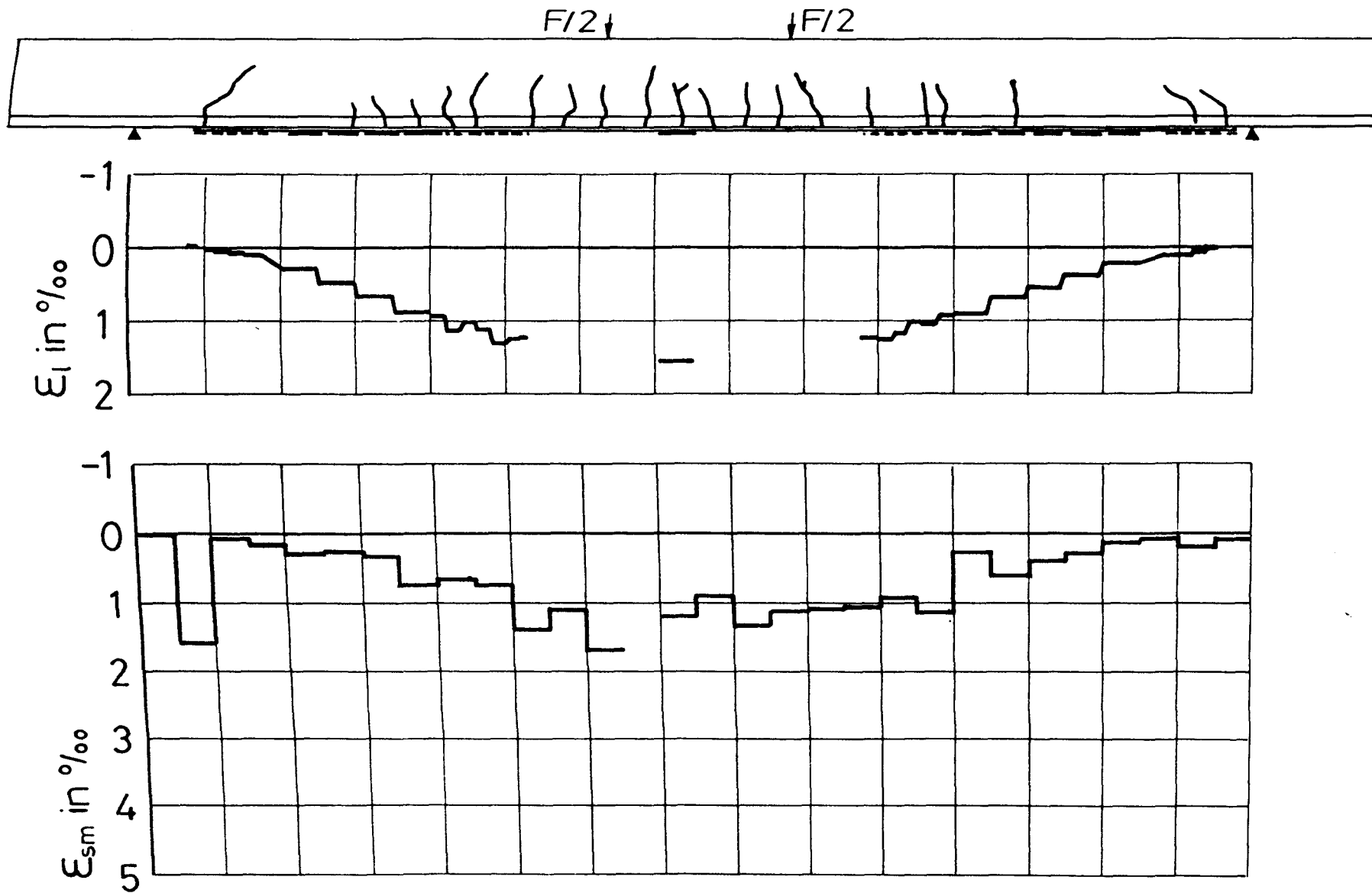


Bild 8.73 : mittlere Stahldehnung ϵ_{sm} und Laschendehnung ϵ_l bei LS 15, $F=55$ kN
 - Balken DB08, LF1

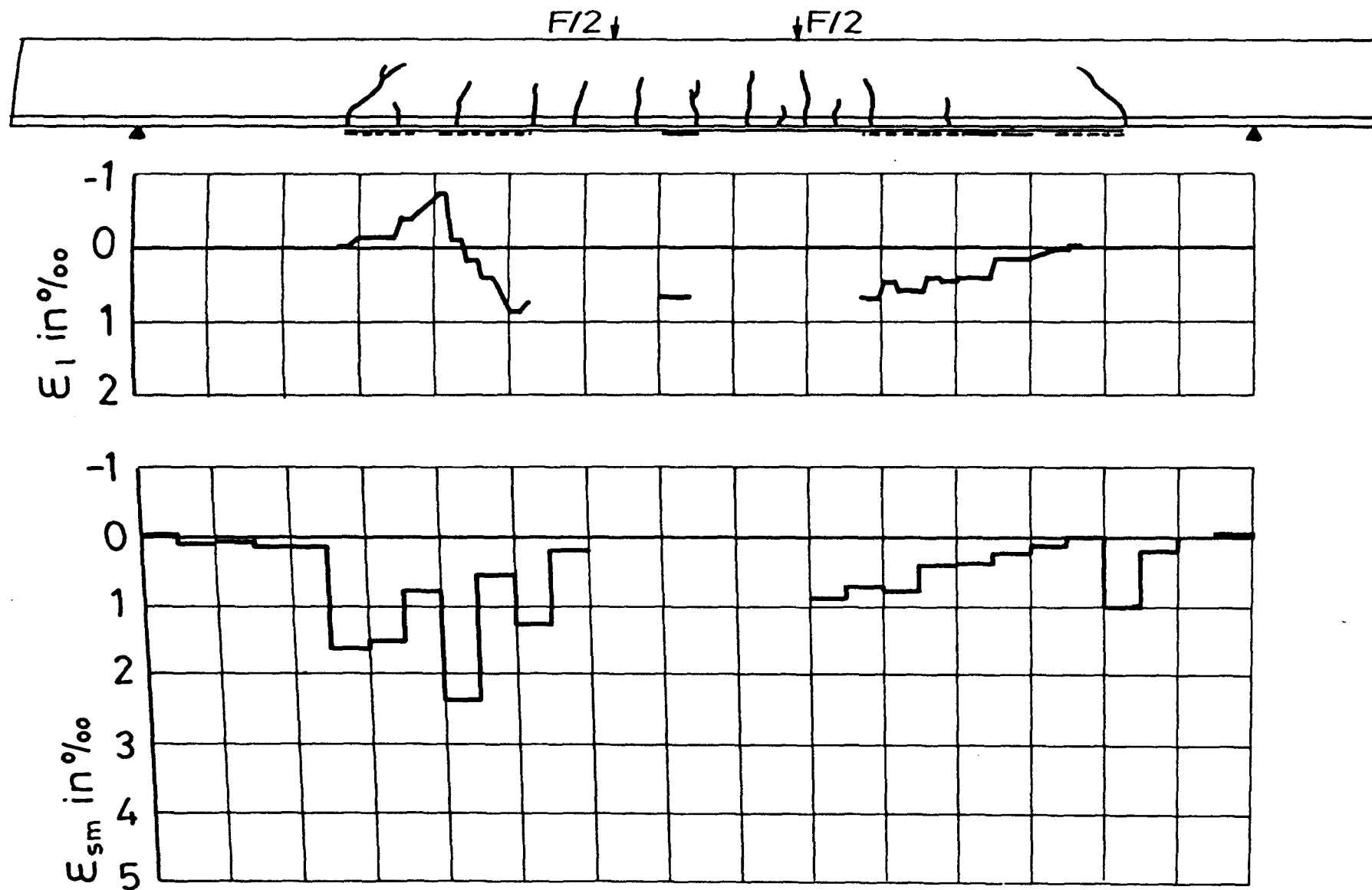


Bild 8.74 : mittlere Stahldehnung ϵ_{sm} und Laschendehnung ϵ_l bei LS 9, $F=32.5$ kN
- Balken DB09, LF1

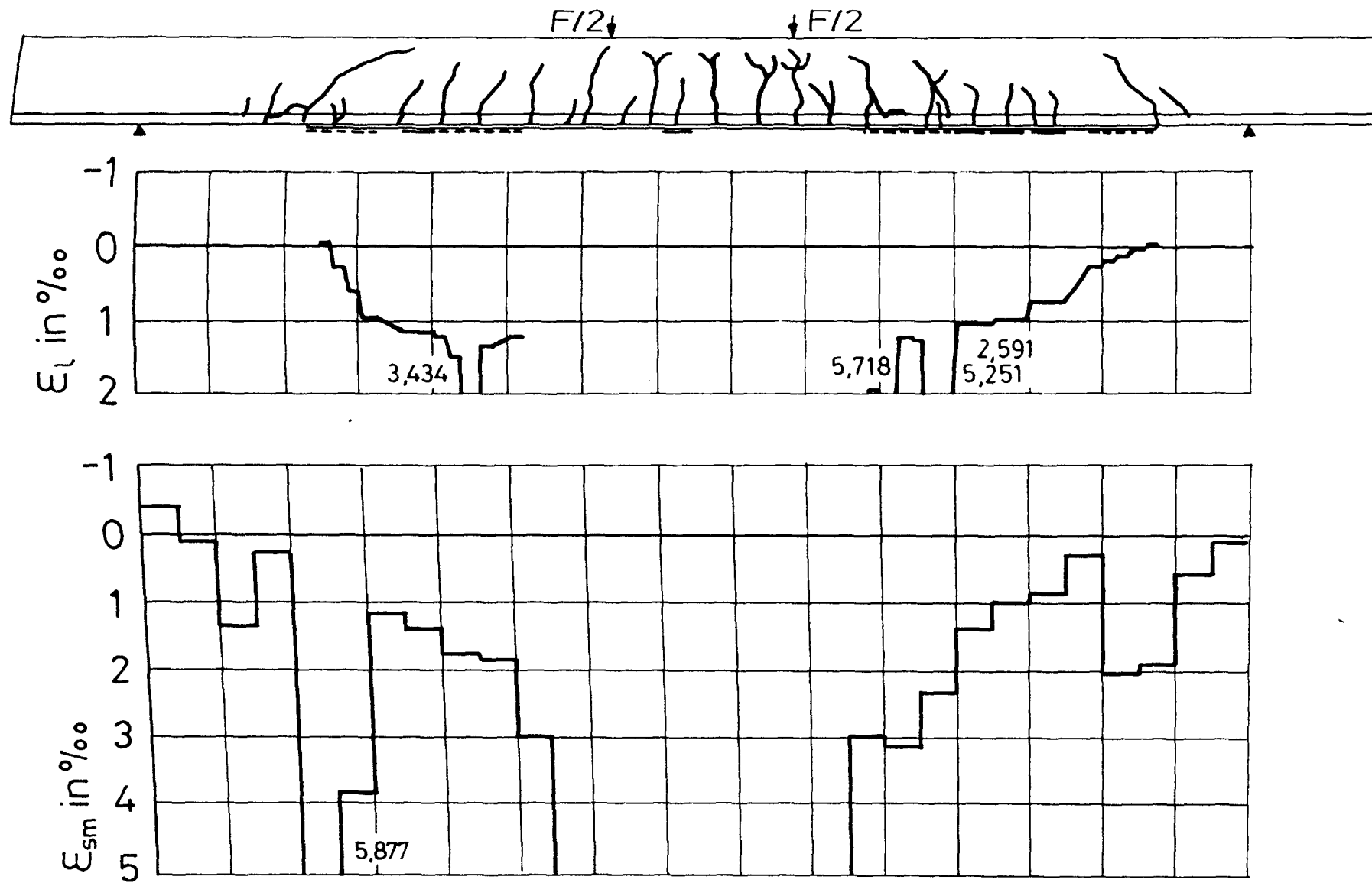


Bild 8.75 : mittlere Stahldehnung ϵ_{sm} und Laschendehnung ϵ_l bei LS 38, $F=66.9$ kN
- Balken DB10, LF1

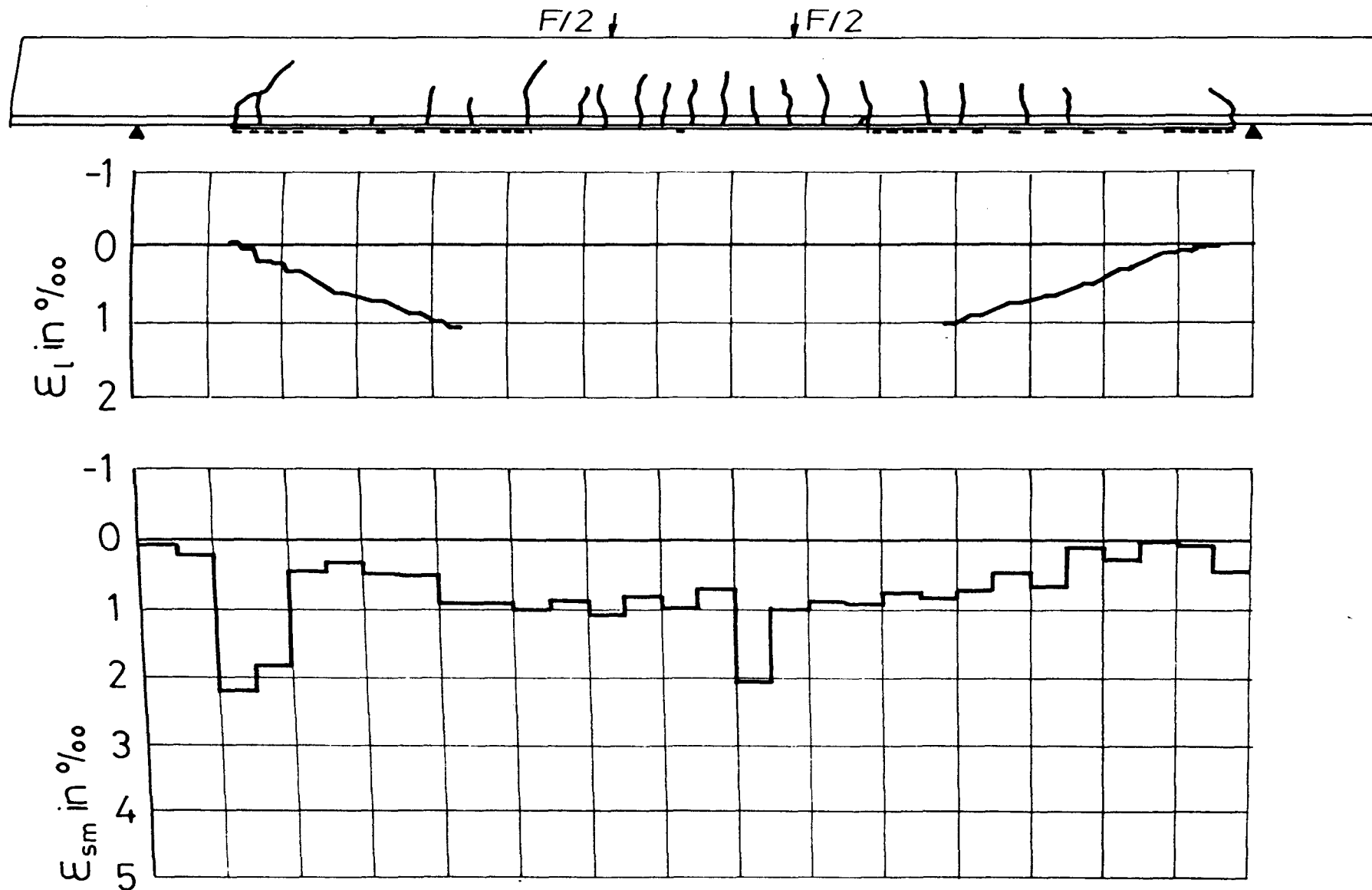


Bild 8.76 : mittlere Stahldehnung ε_{sm} und Laschendehnung ε_l bei LS 15, $F=75$ kN
- Balken SB01, LF1

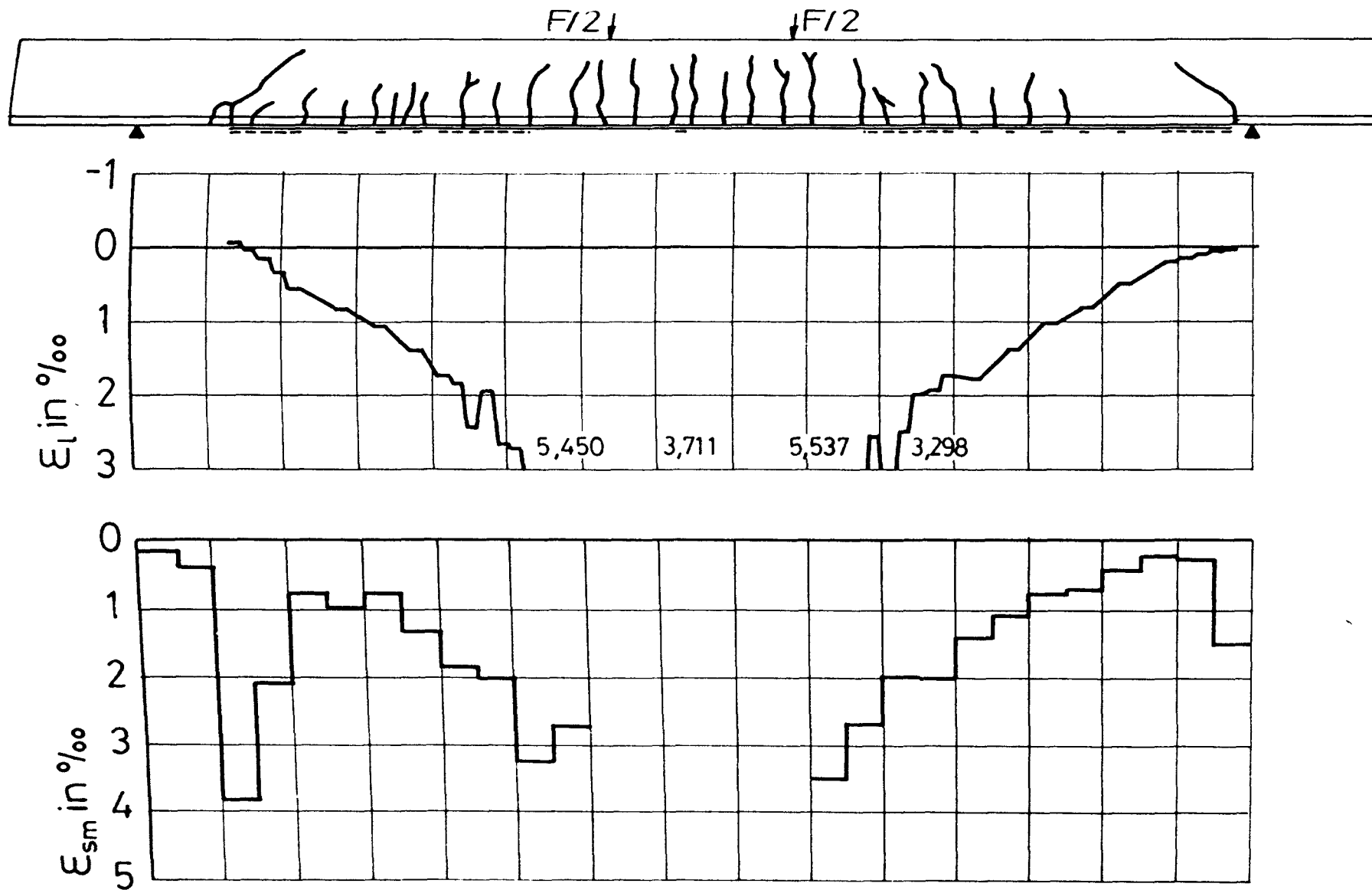


Bild 8.77 : mittlere Stahldehnung ϵ_{sm} und Laschendehnung ϵ_l bei LS 23, $F=92$ kN
- Balken SB02, LF1

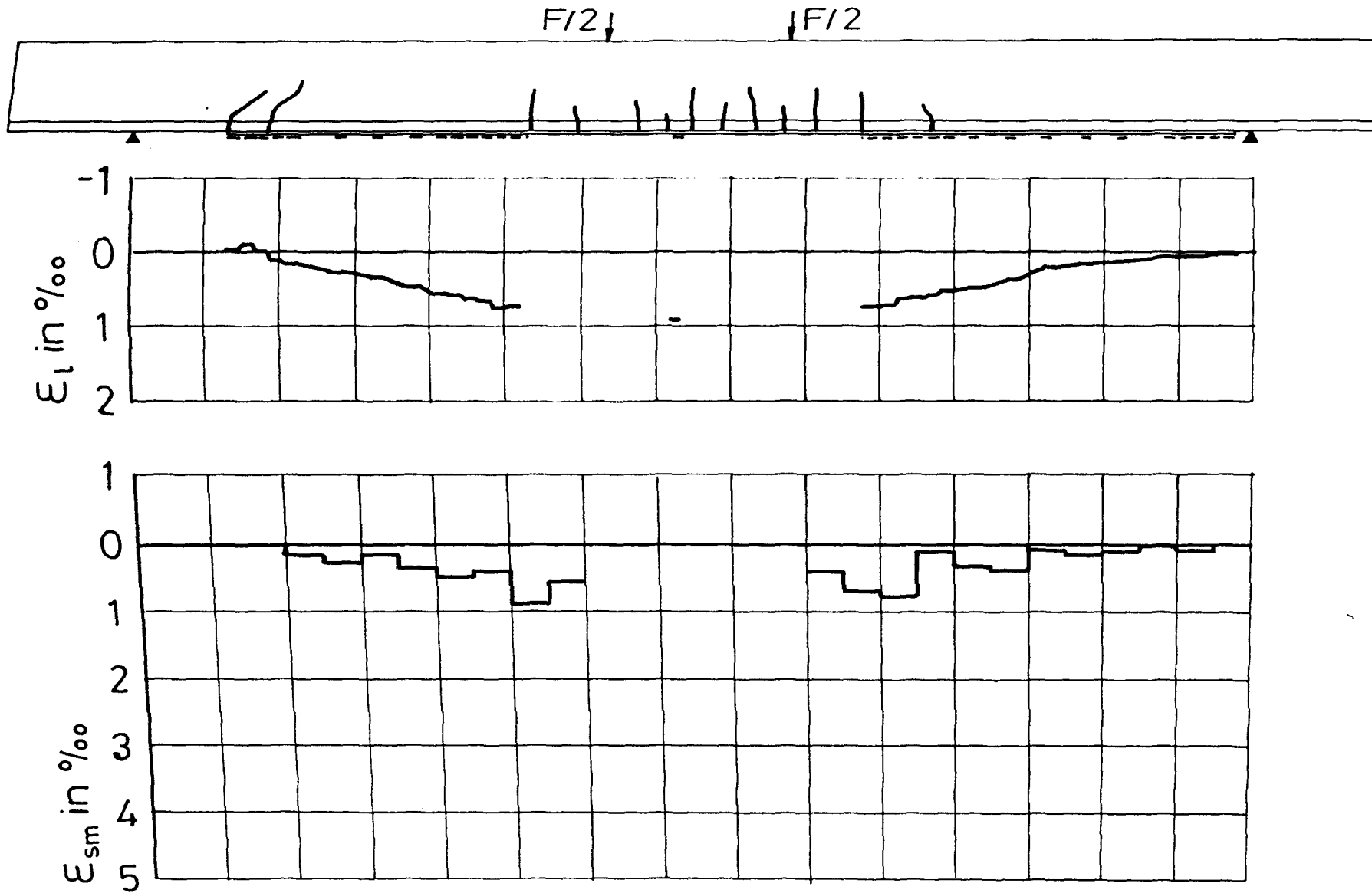


Bild 8.78 : mittlere Stahldehnung ϵ_{sm} und Laschendehnung ϵ_l bei LS 9, $F=40$ kN
 - Balken SB03, LF1

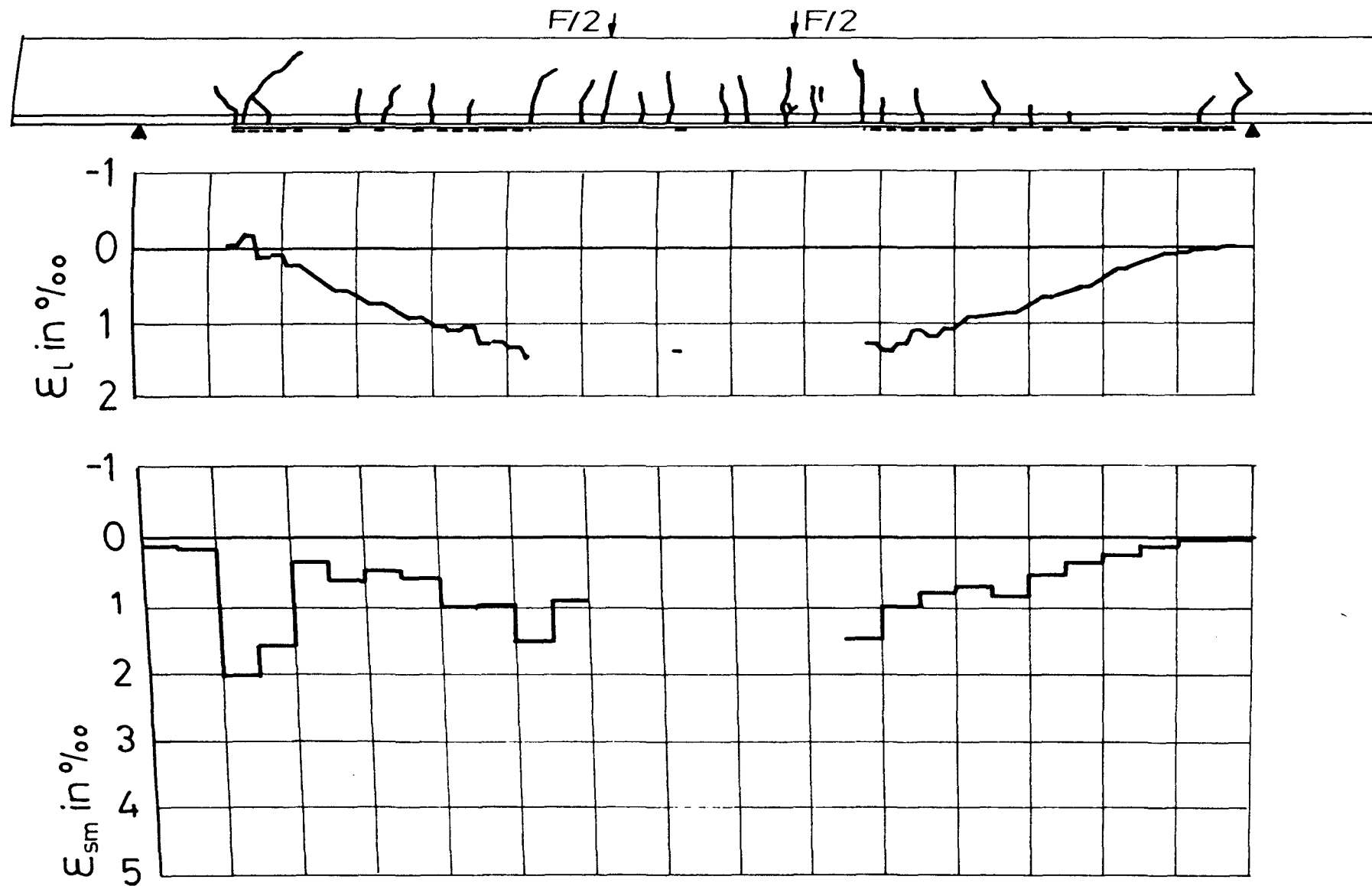


Bild 8.79 : mittlere Stahldehnung ϵ_{sm} und Laschendehnung ϵ_l bei LS 15, $F=70$ kN
- Balken SB04, LF1

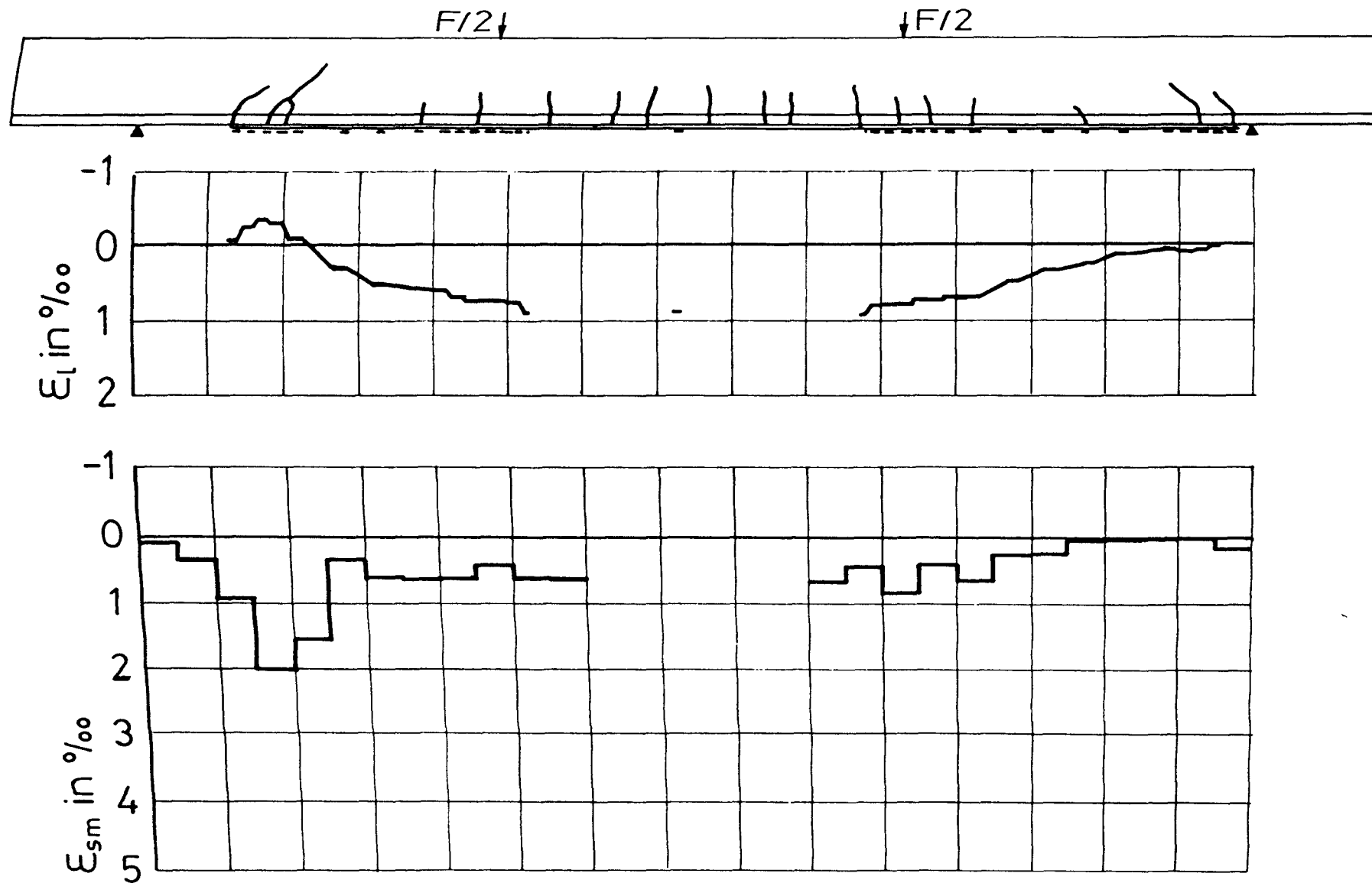


Bild 8.80 : mittlere Stahldehnung ϵ_{sm} und Laschendehnung ϵ_l bei LS 16, $F=55$ kN
- Balken SB05, LF1

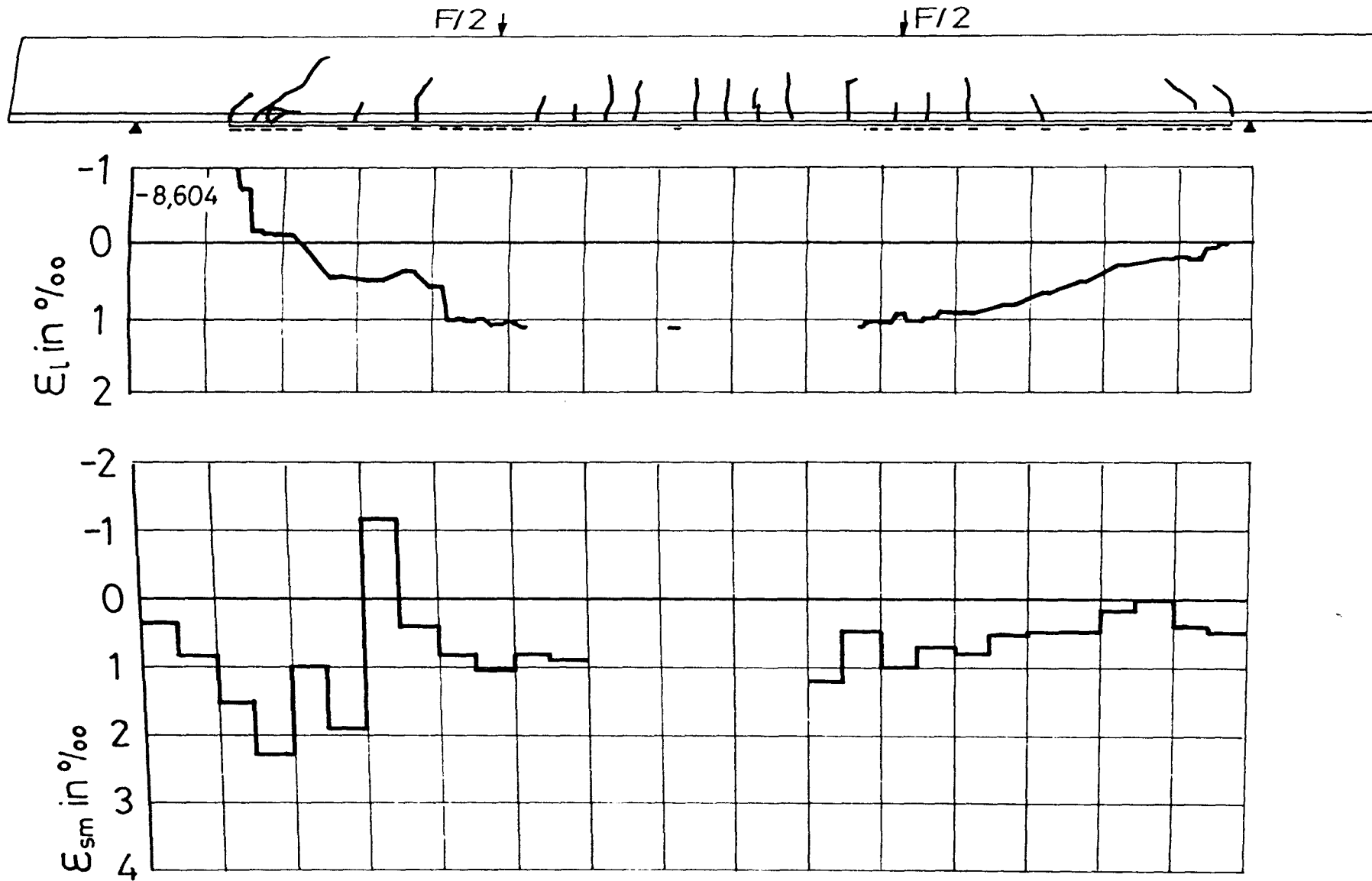


Bild 8.81 : mittlere Stahldehnung ϵ_{sm} und Laschendehnung ϵ_l bei LS 14, $F=65$ kN
- Balken SB06, LF1

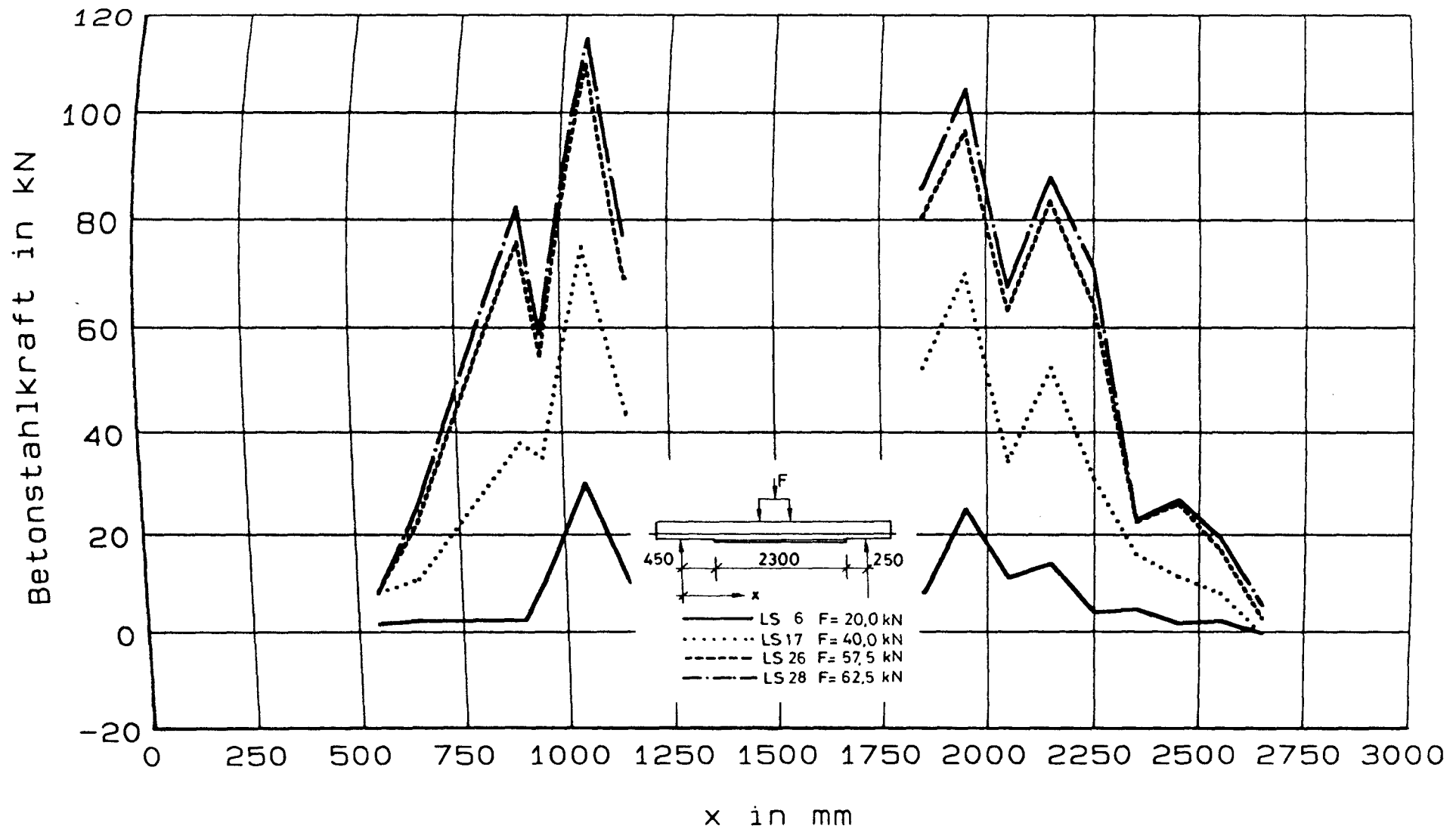


Bild 8.82 : Betonstahlkraft, untere Lage - Balken DB01, LF1

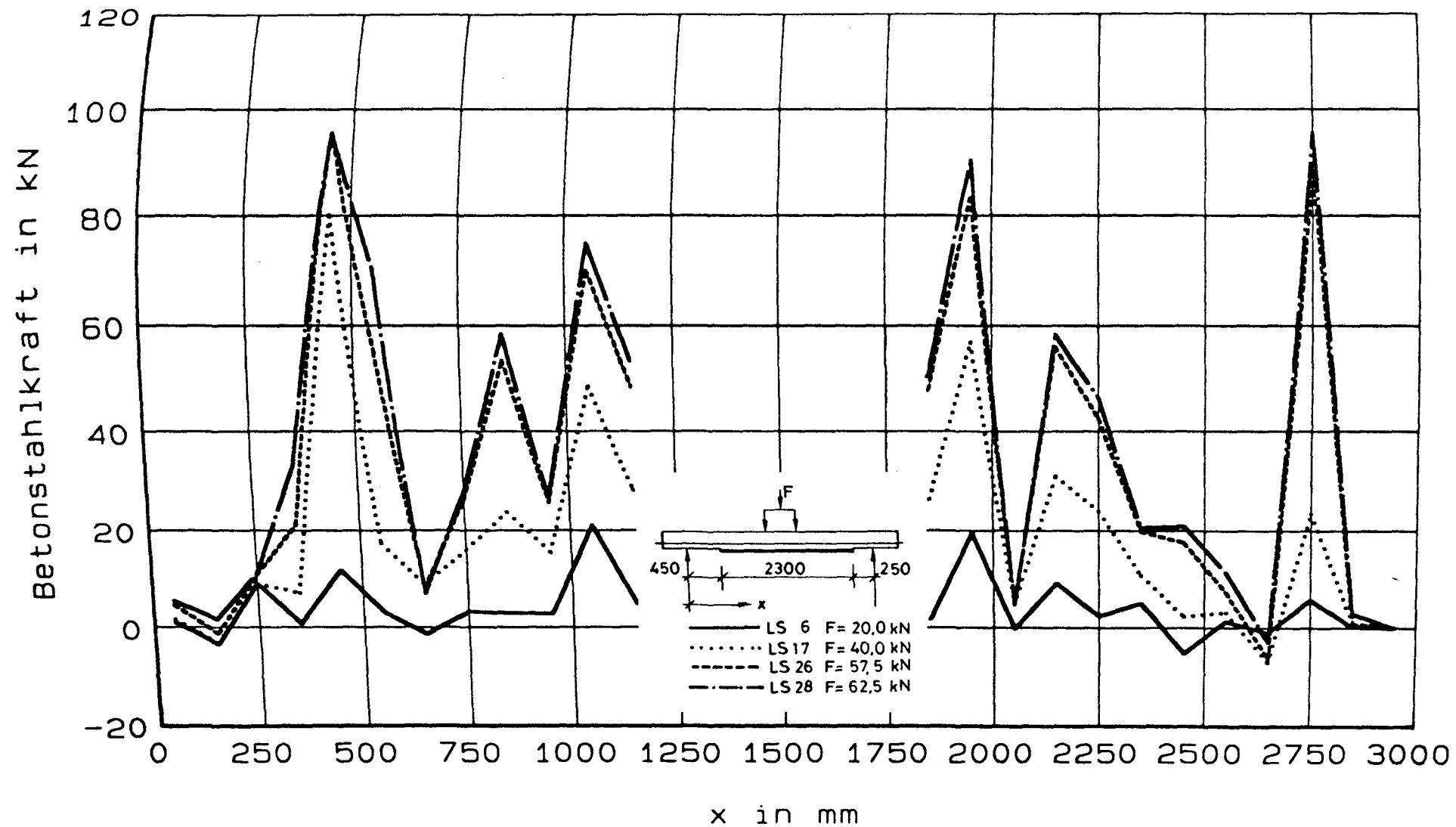


Bild 8.83 : Betonestahlkraft, obere Lage - Balken DB01, LF1

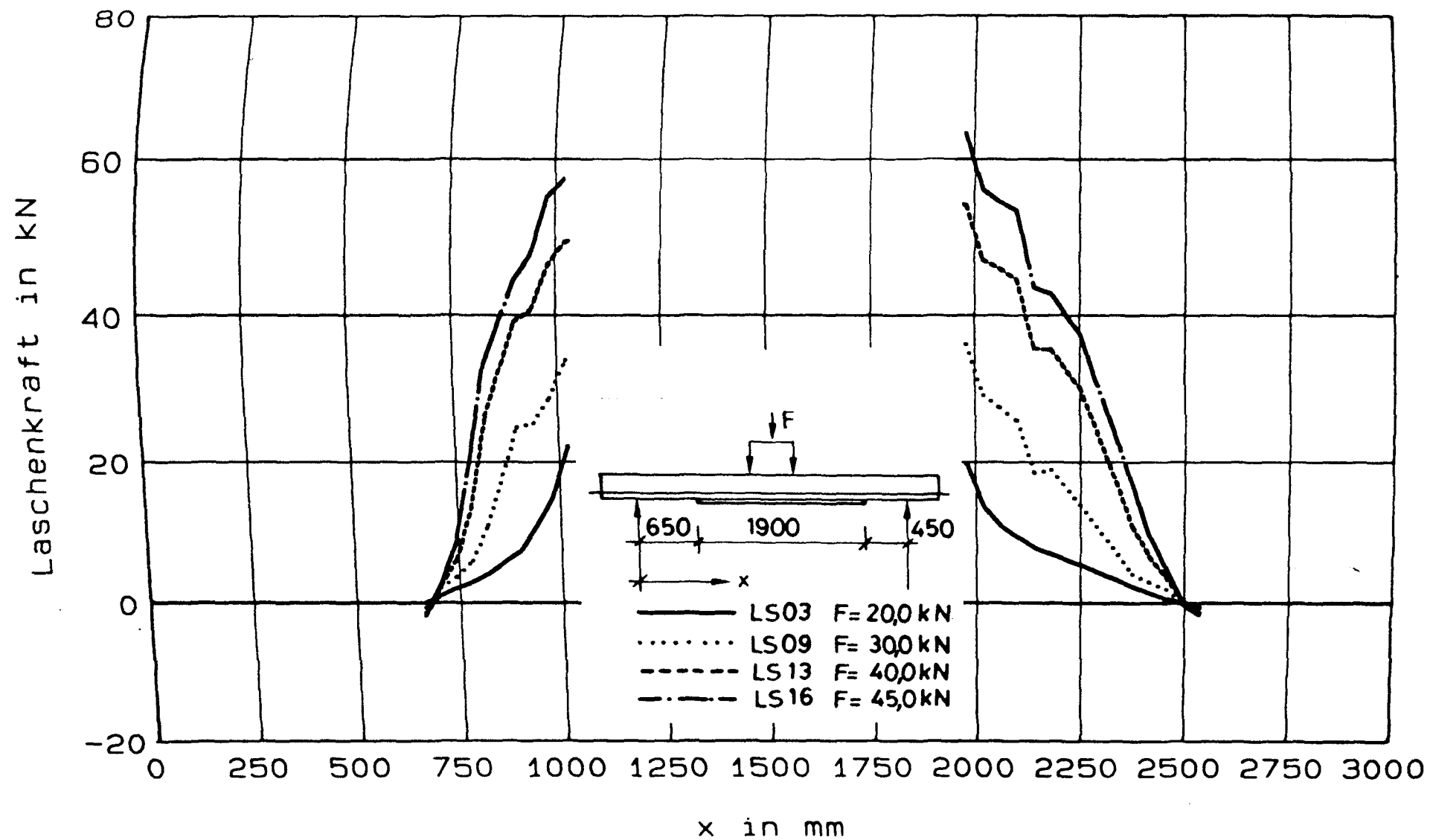


Bild 8.84 : Laschenkraft - Balken DB02, LF1

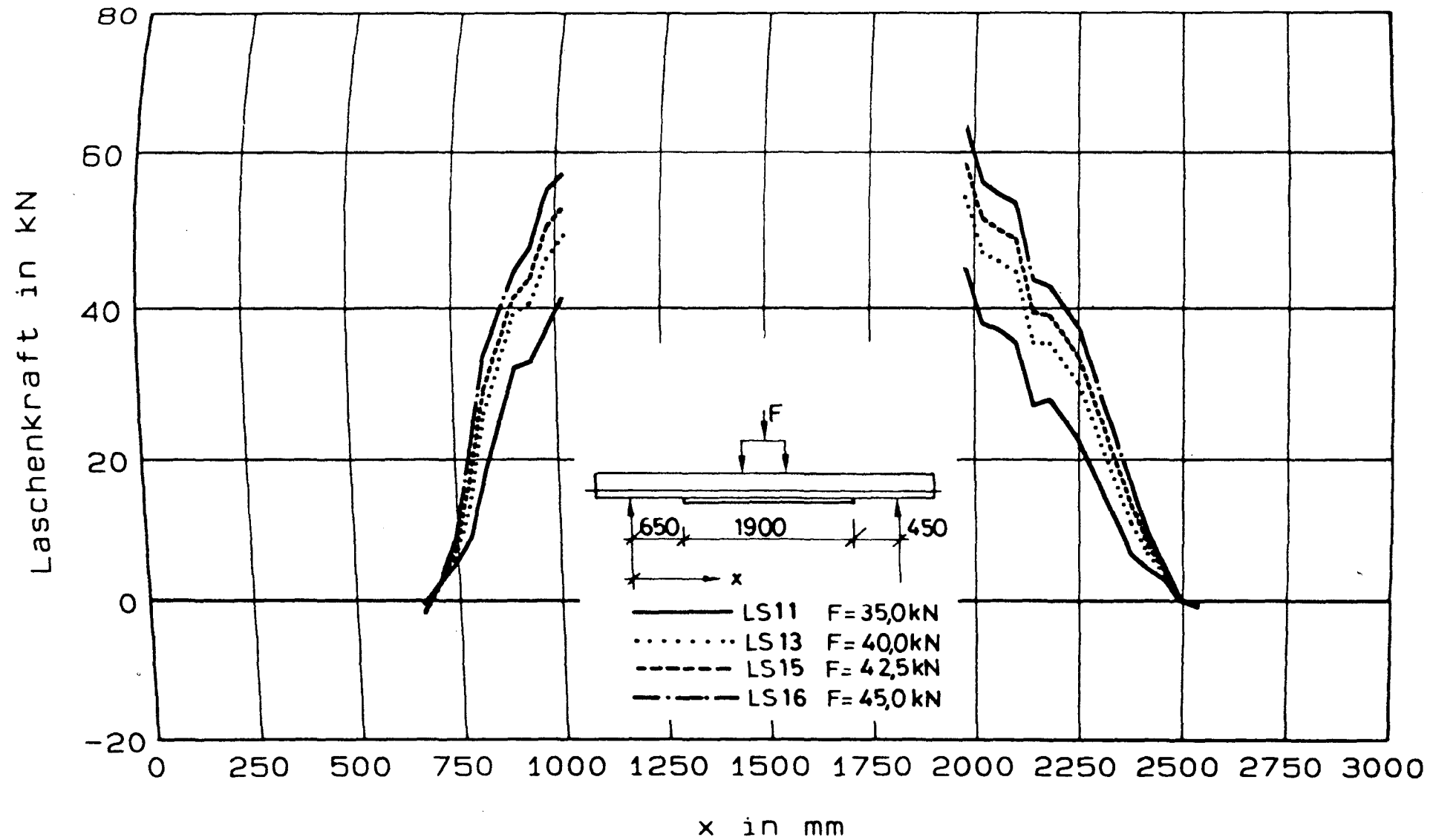


Bild 8.85 : Laschenkraft - Balken DB02. LF1

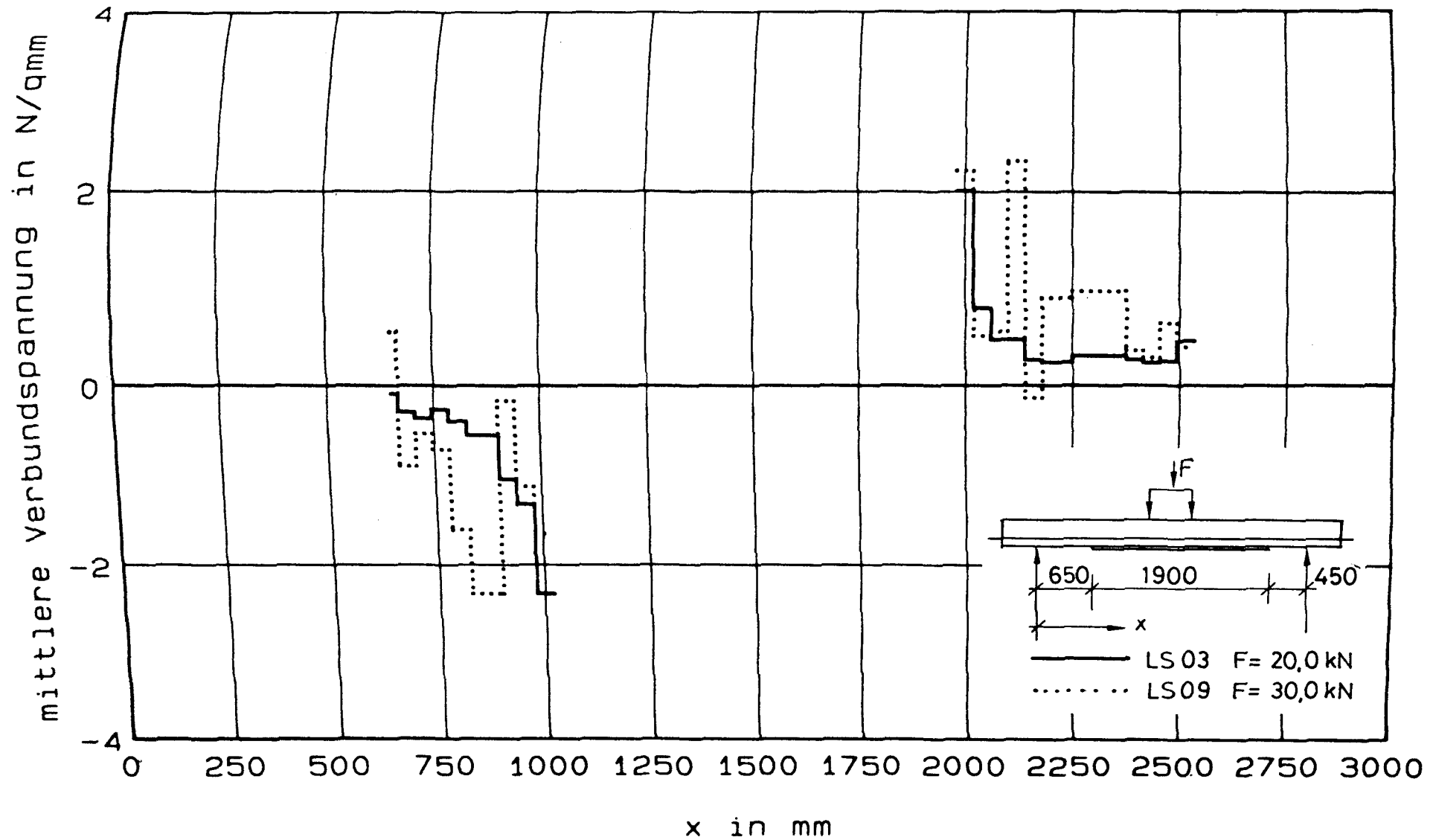


Bild 8.86 : mittlere Verbundspannung - Balken DB02, LF1

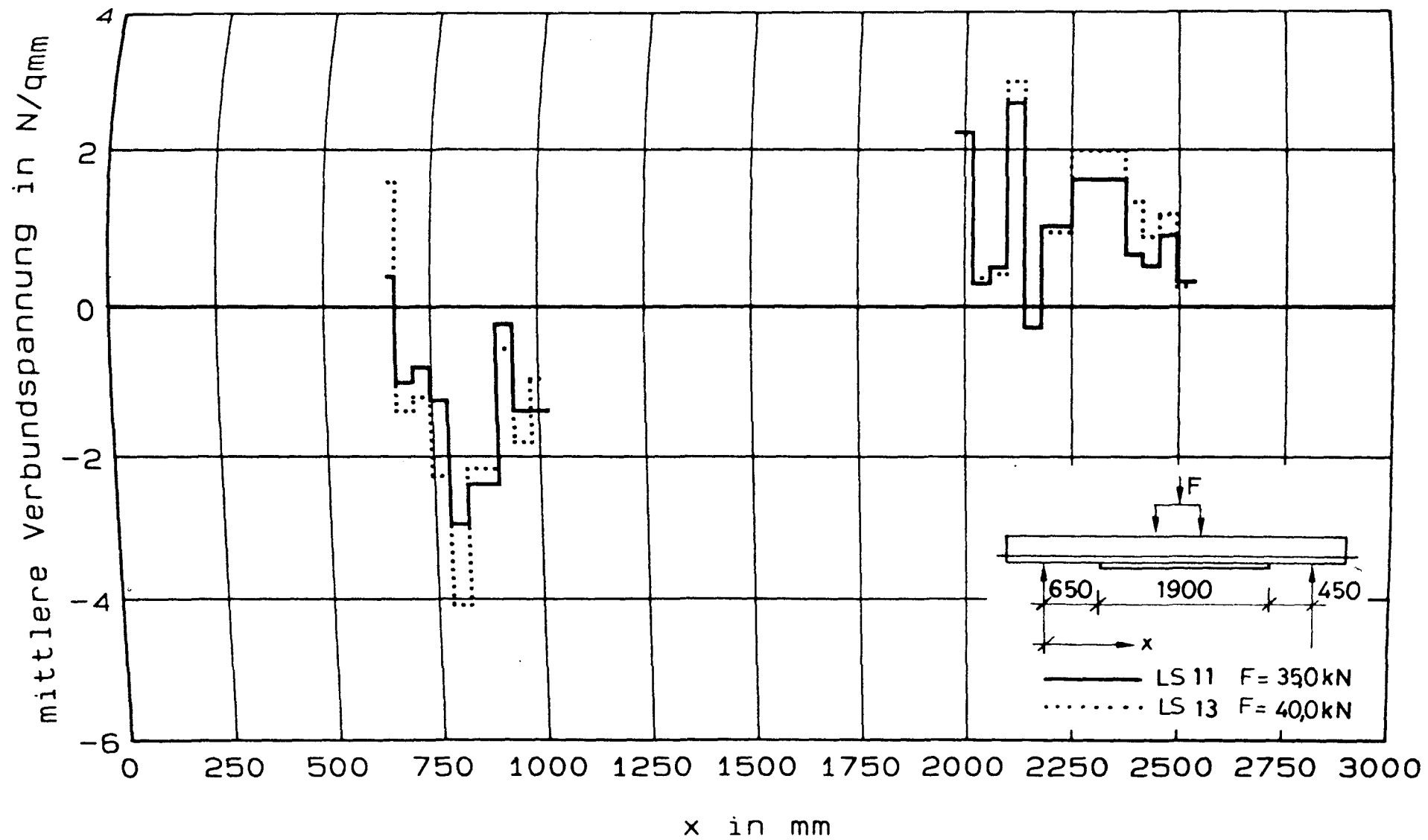


Bild 8.87 : mittlere Verbundspannung - Balken DB02. LF1

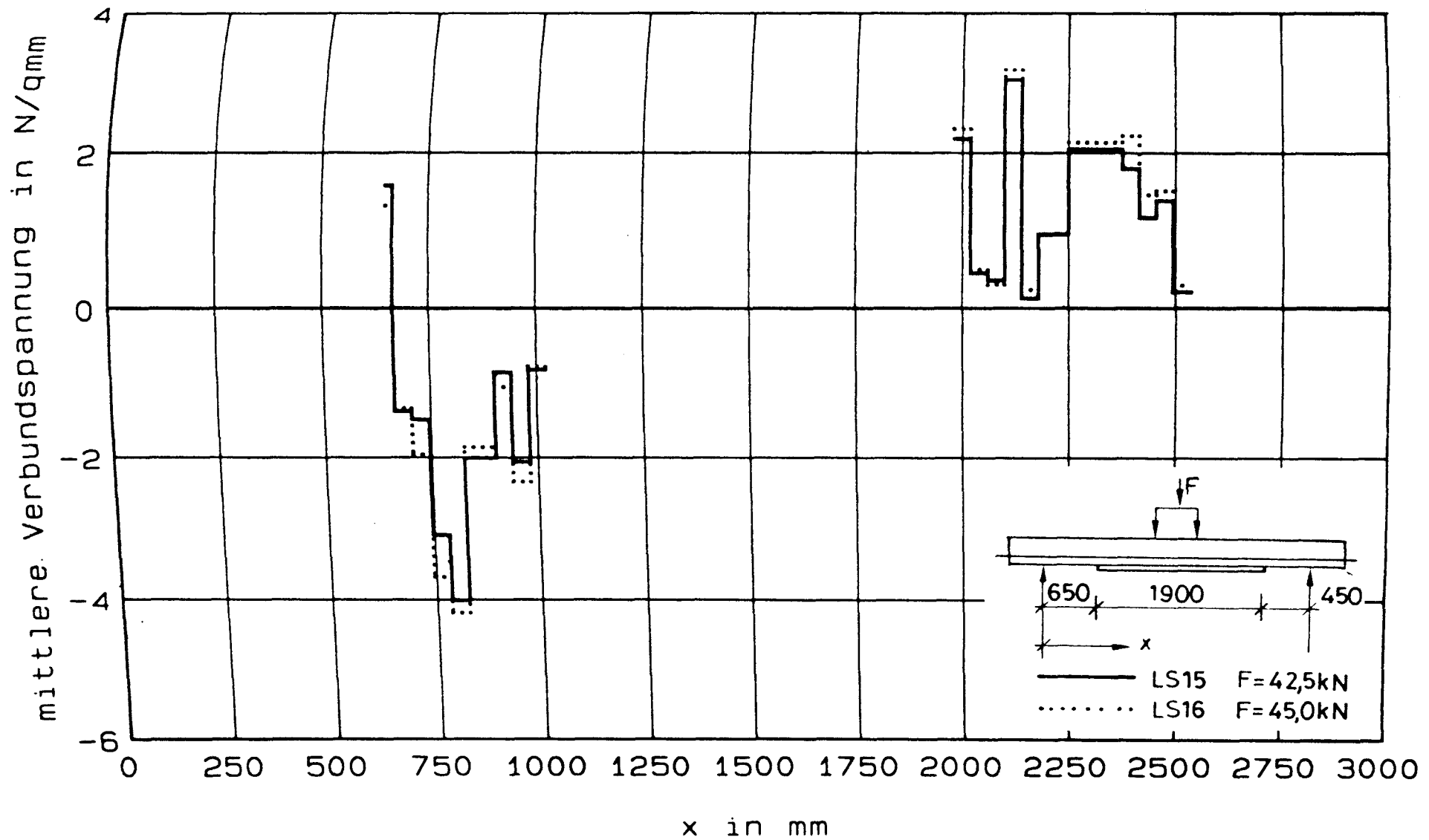


Bild 8.88 : mittlere Verbundspannung - Balken DB02. LF1

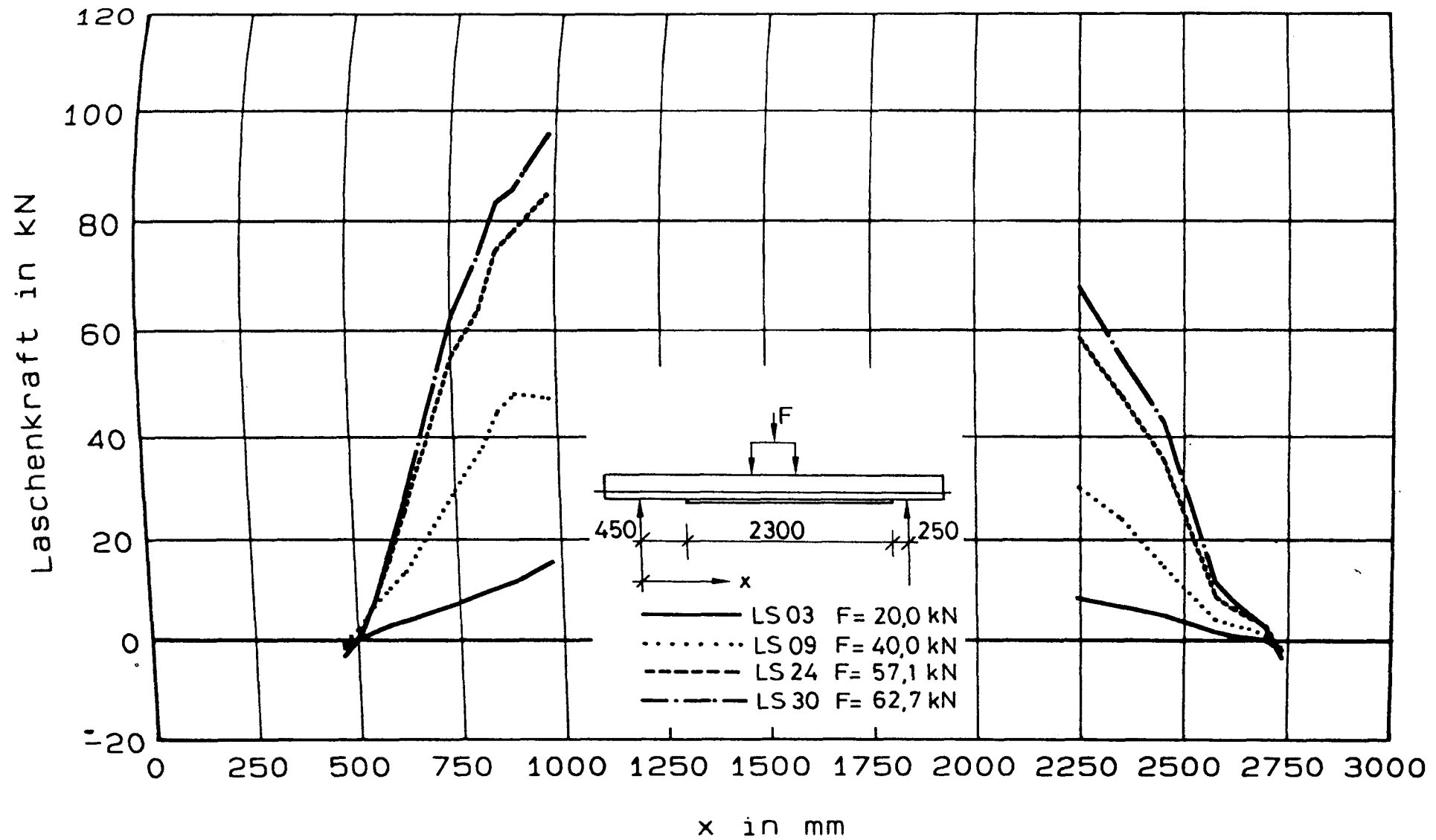


Bild 8.89 : Laschenkraft - Balken DB04, LF1

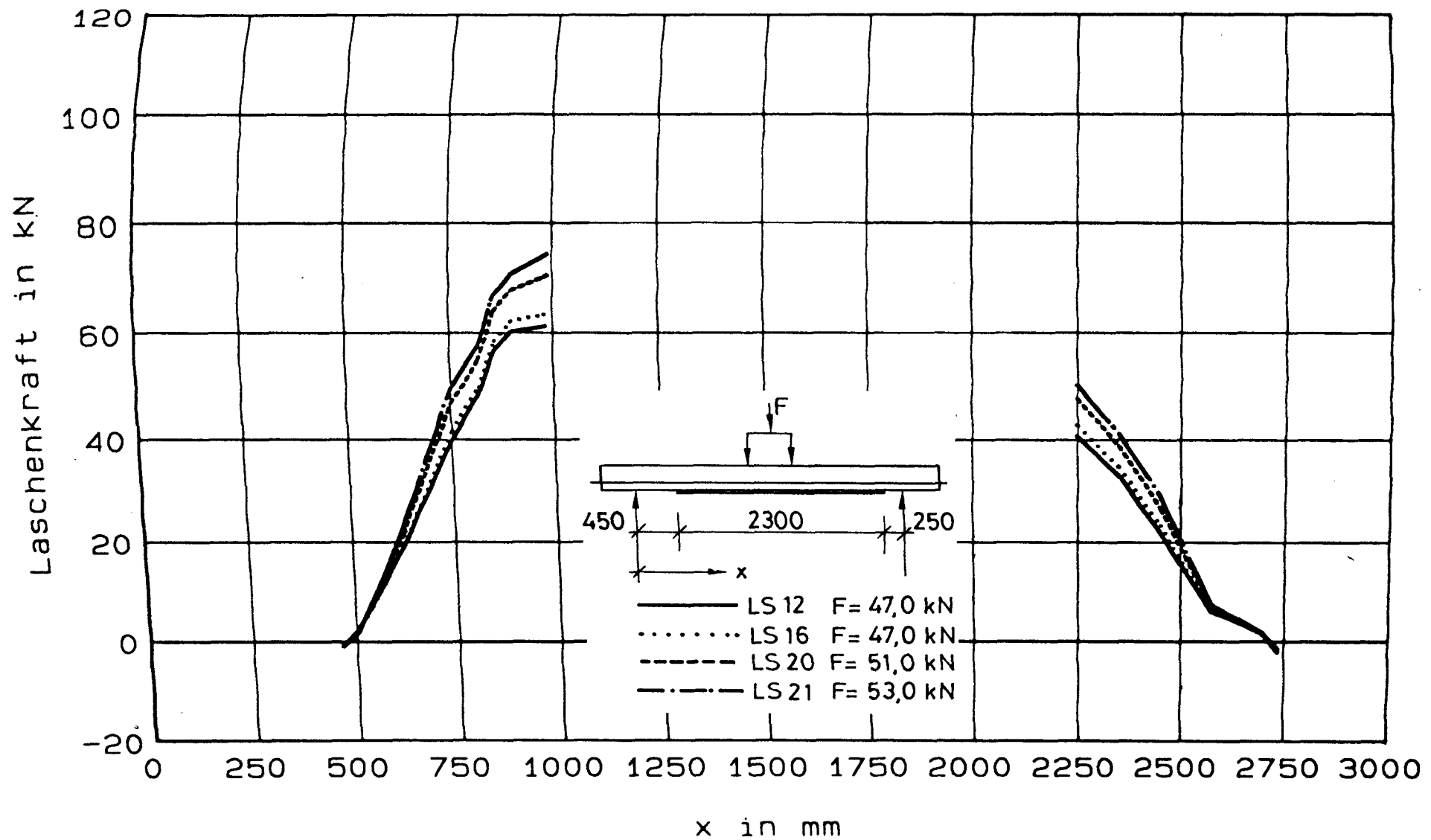


Bild 8.90 : Laschenkraft - Balken DB04, LF1

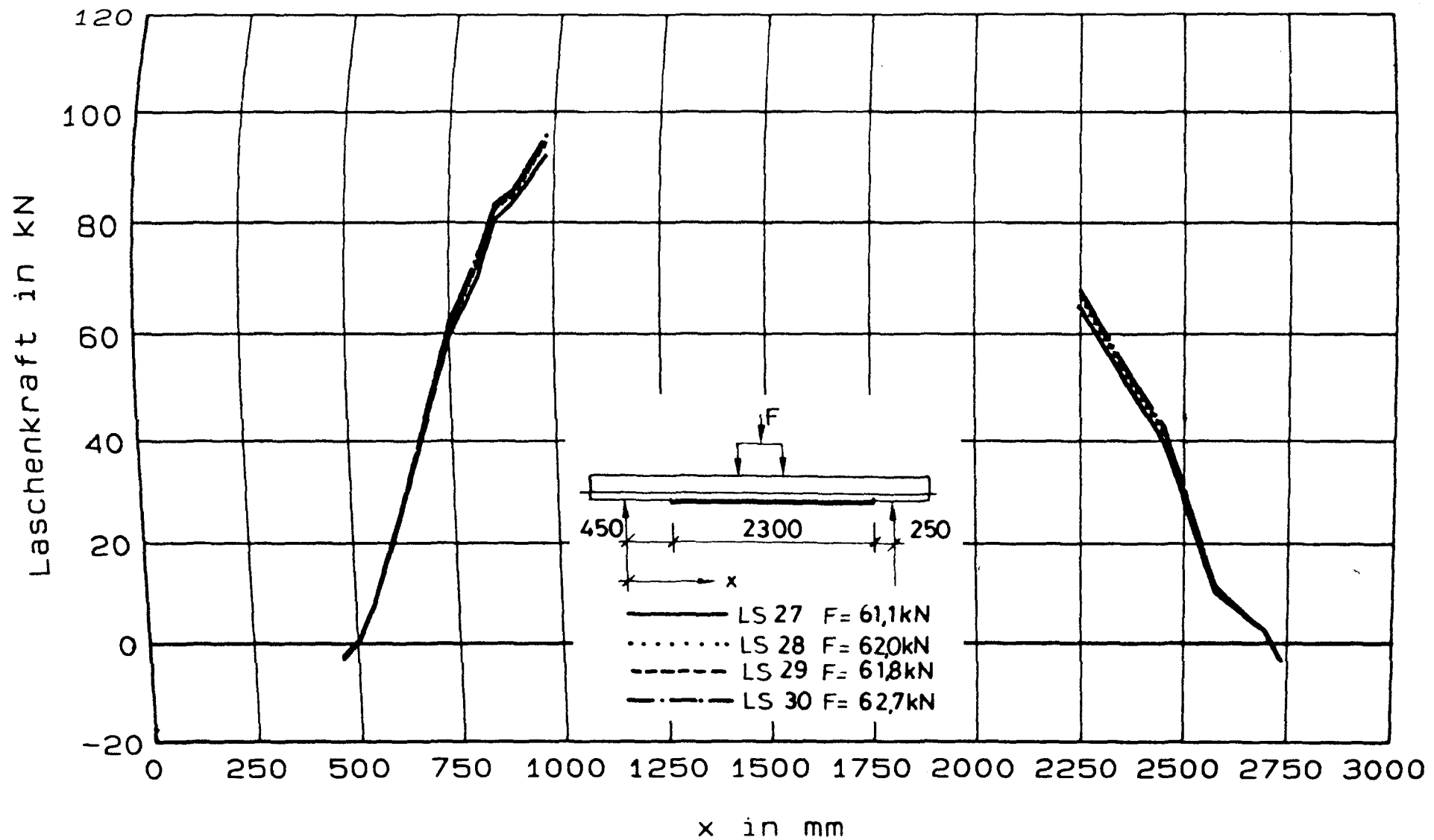


Bild 8.91 : Laschenkraft - Balken DB04. LF1

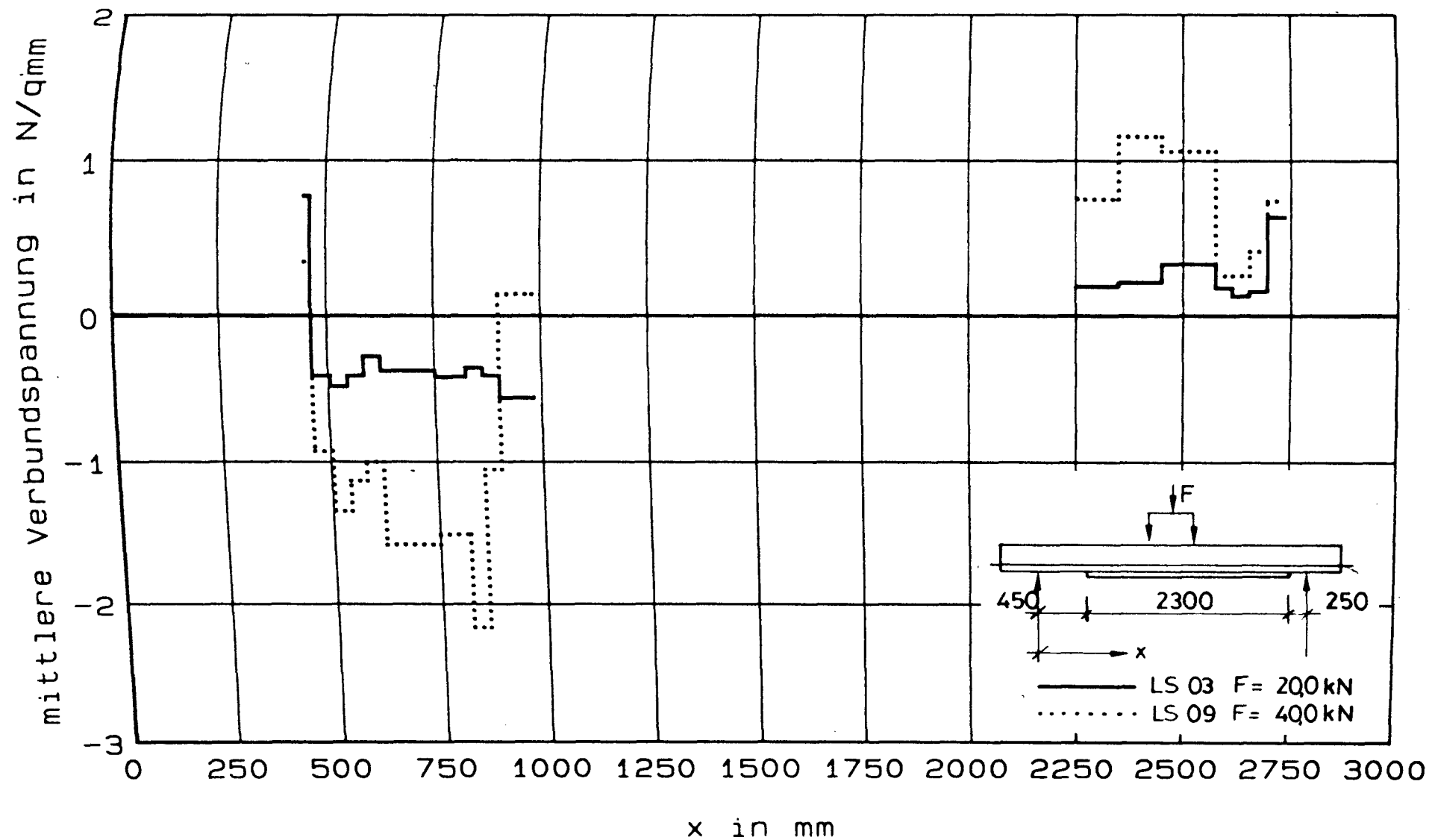


Bild 8.92 : mittlere Verbundspannung - Balken DB04, LF1

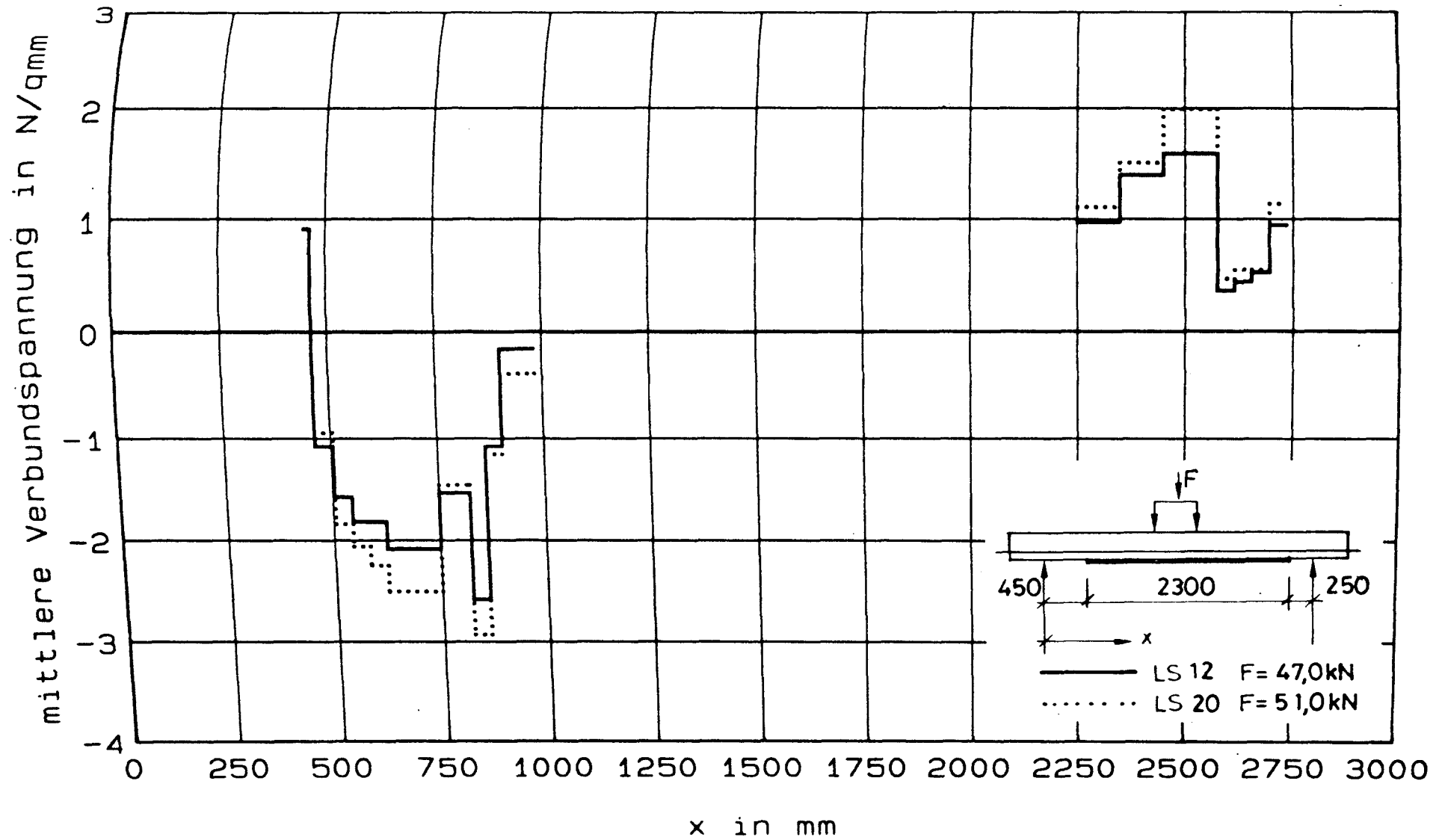


Bild 8.93 : mittlere Verbundspannung - Balken DB04. LF1

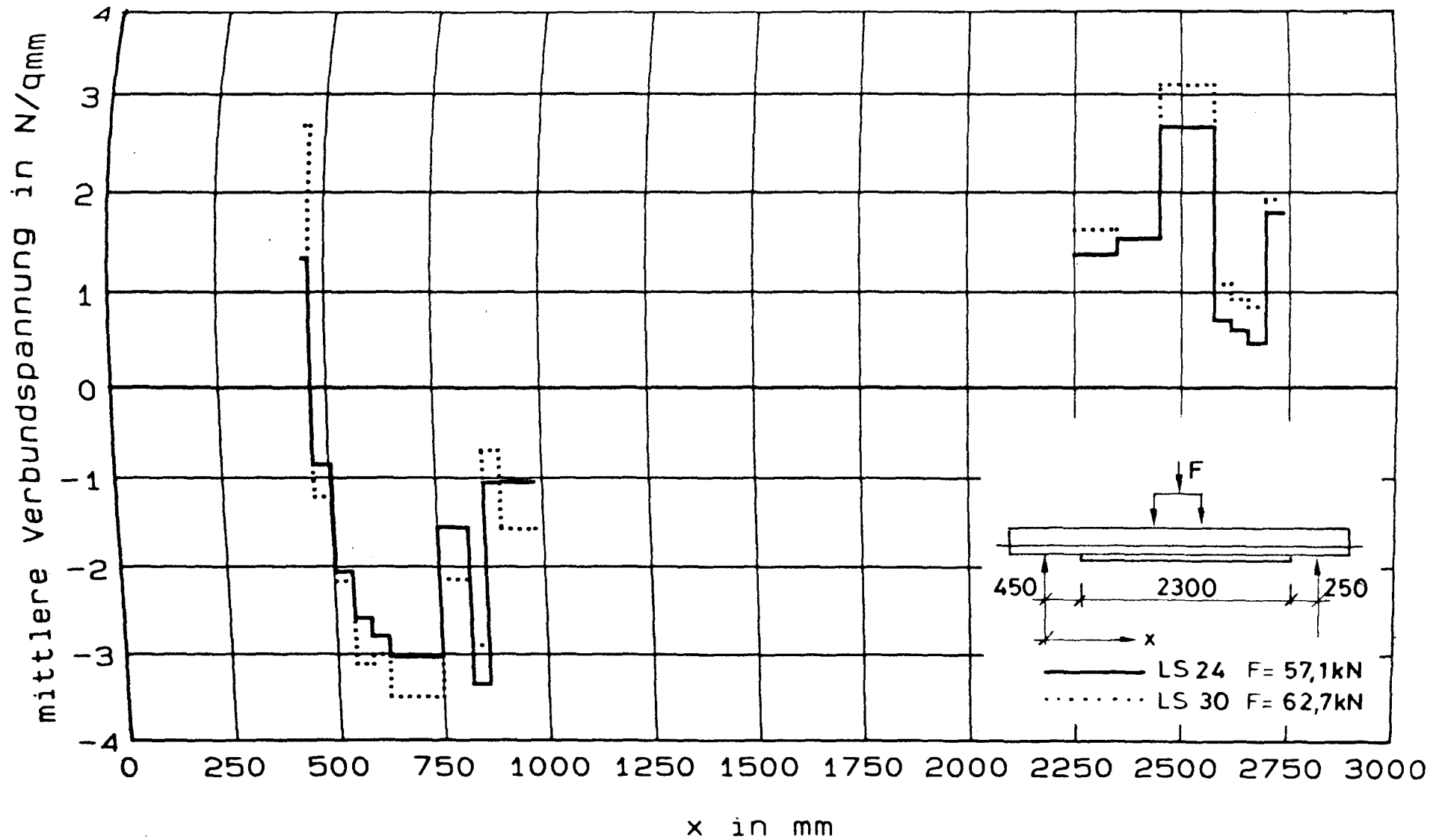


Bild 8.94 : mittlere Verbundspannung - Balken DB04, LF1

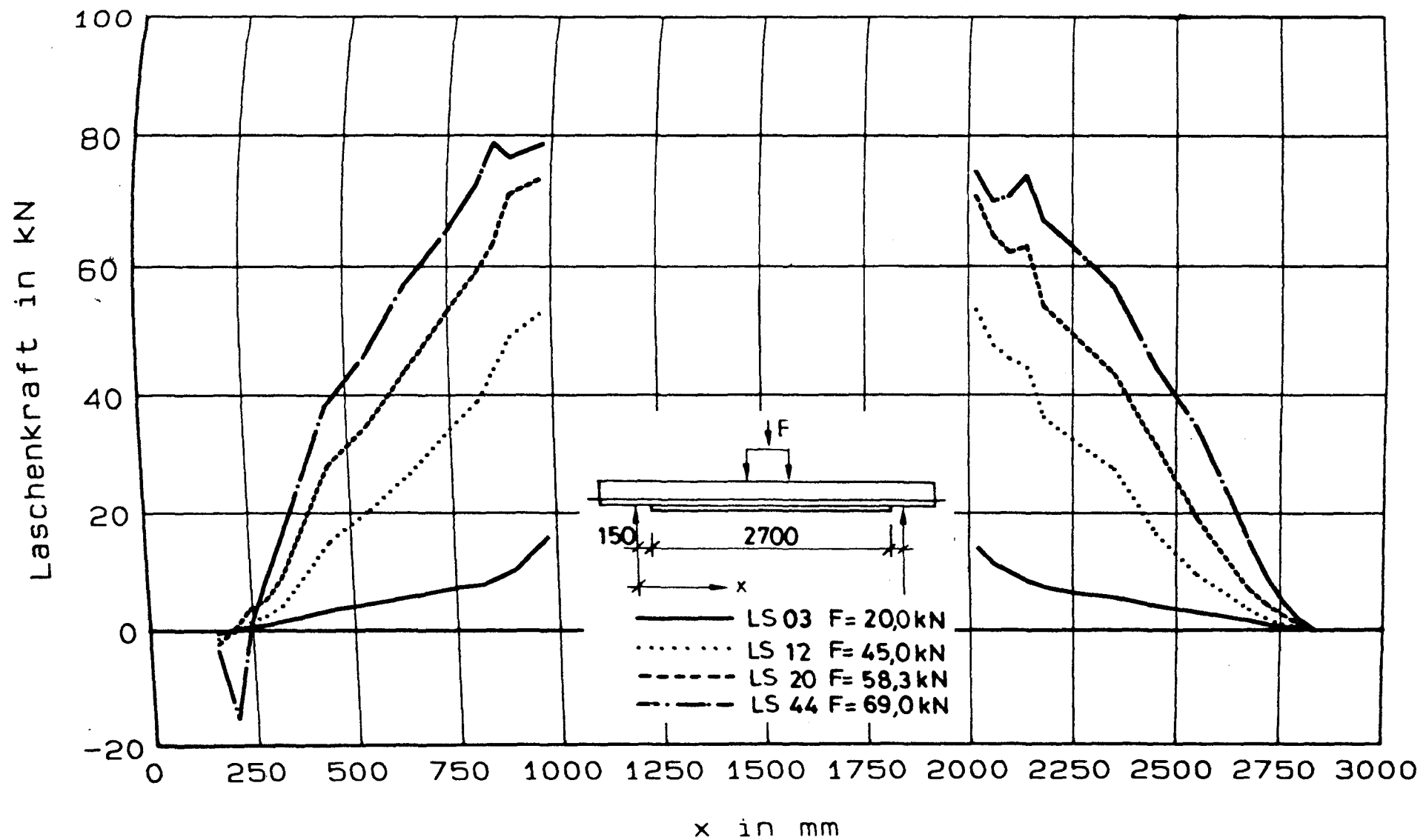


Bild 8.95 : Laschenkraft - Balken DB06, LF1

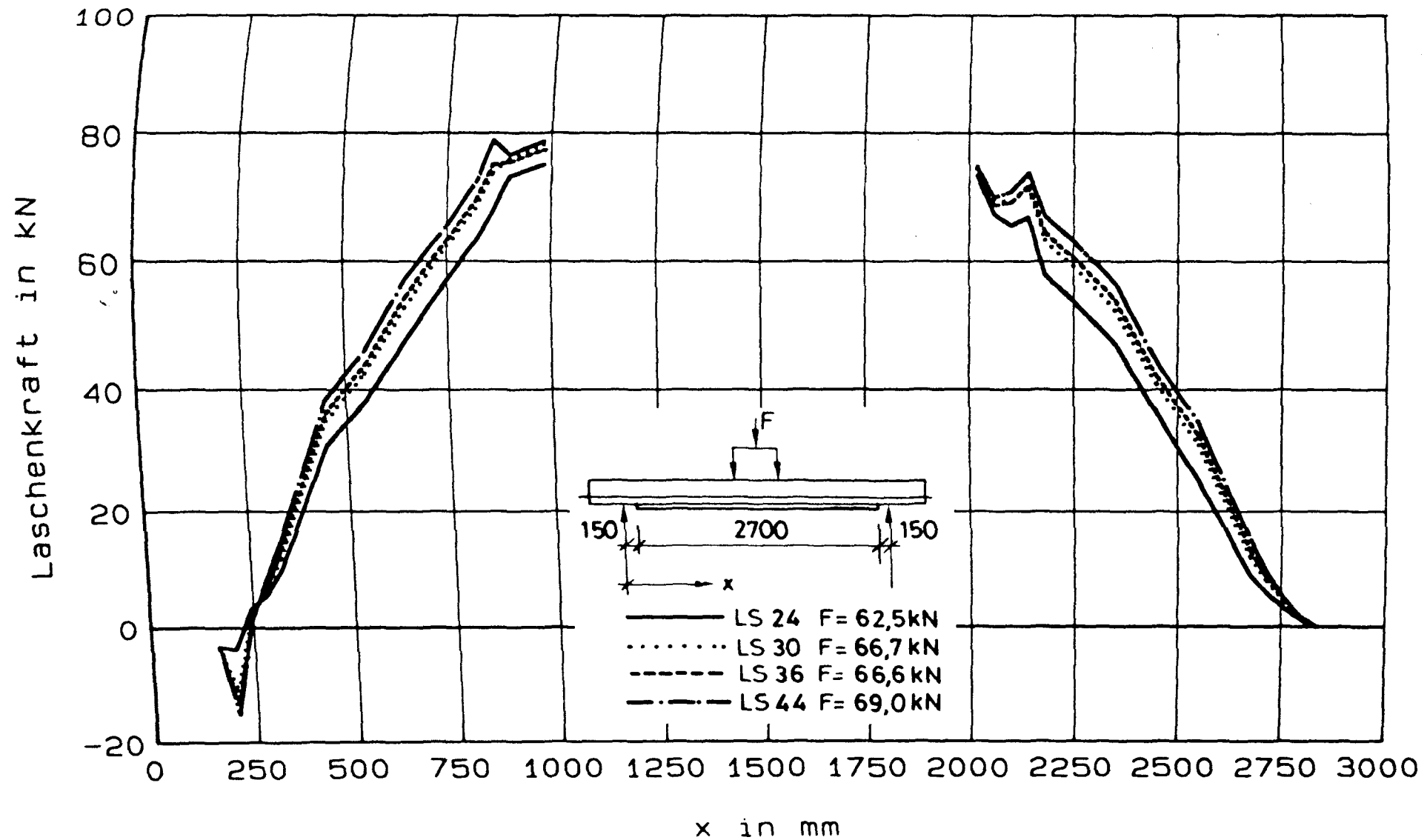


Bild 8.96 : Laschenkraft - Balken DB06, LF1

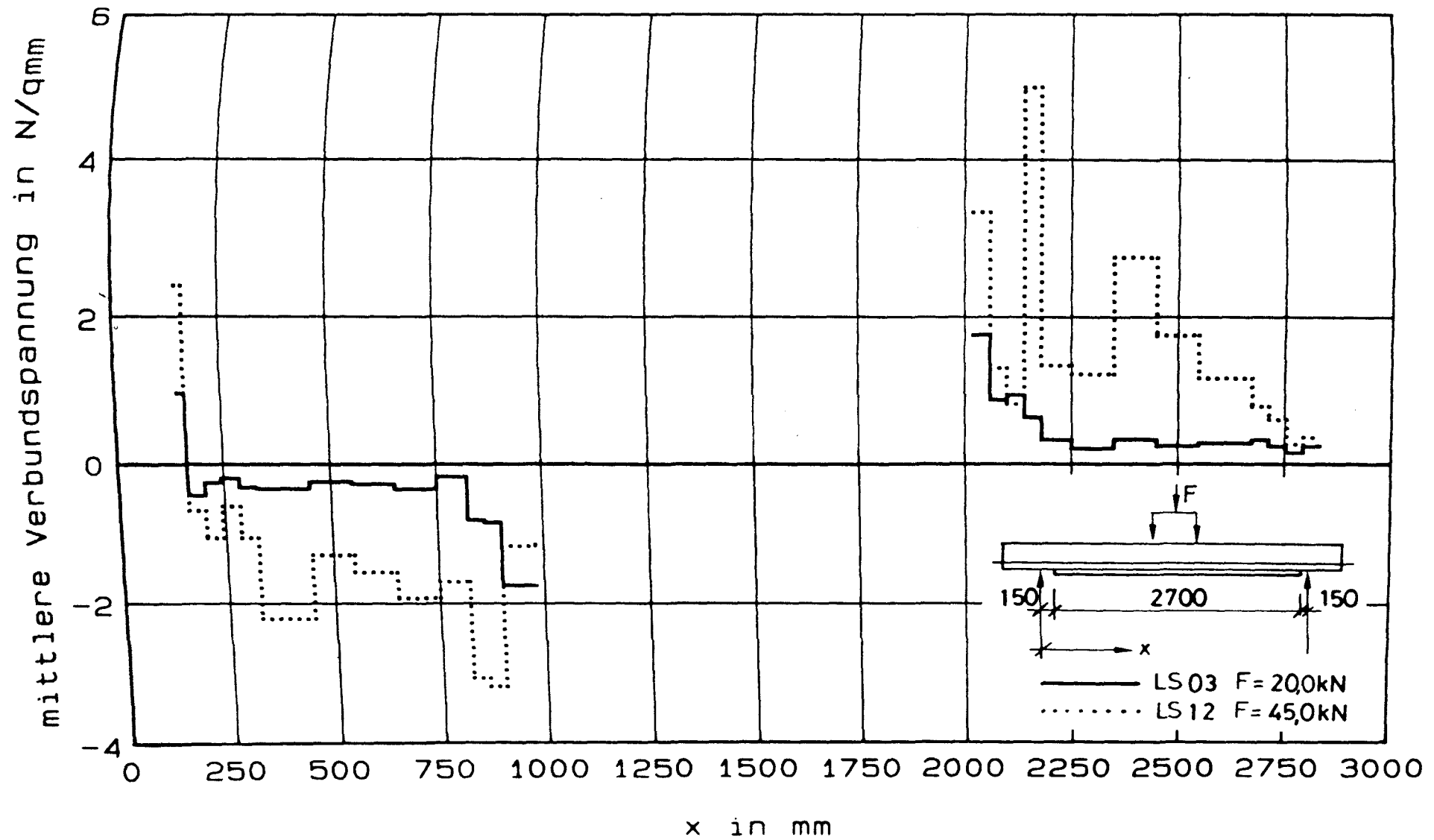


Bild 8.97 : mittlere Verbundspannung - Balken DB06, LF1

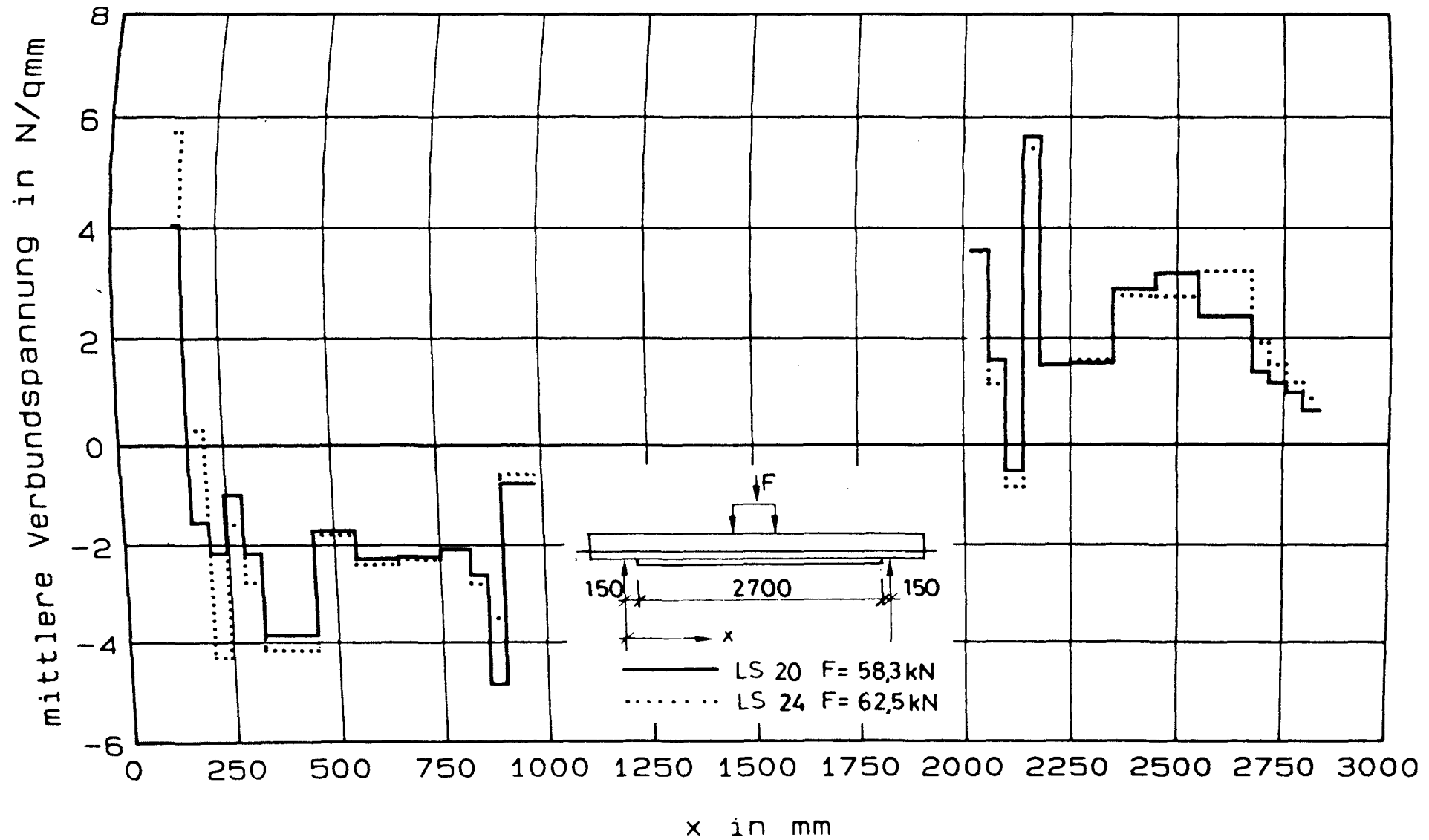


Bild 8.98 : mittlere Verbundspannung - Balken DB06. LF1

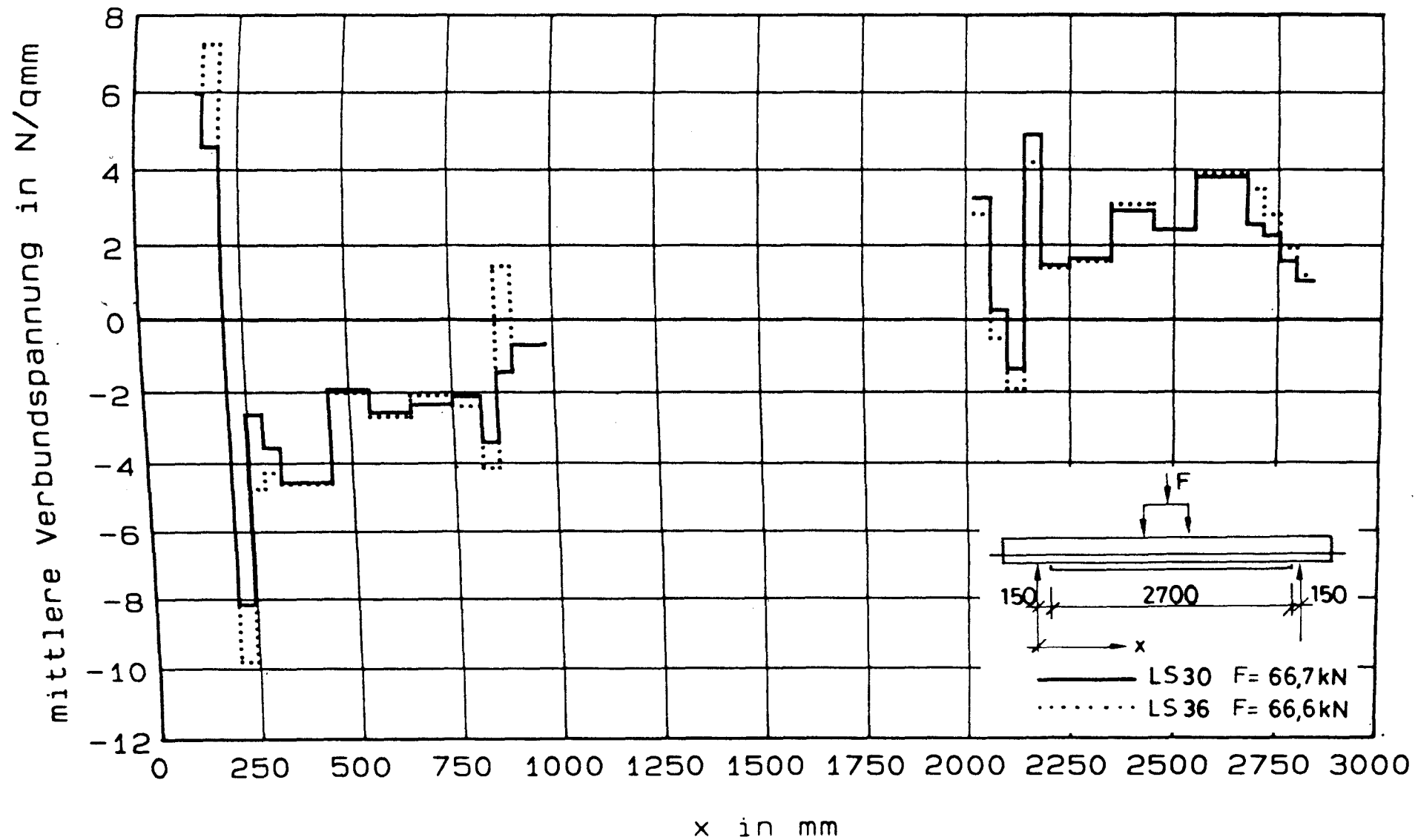


Bild 8.99 : mittlere Verbundspannung - Balken DB06, LF1

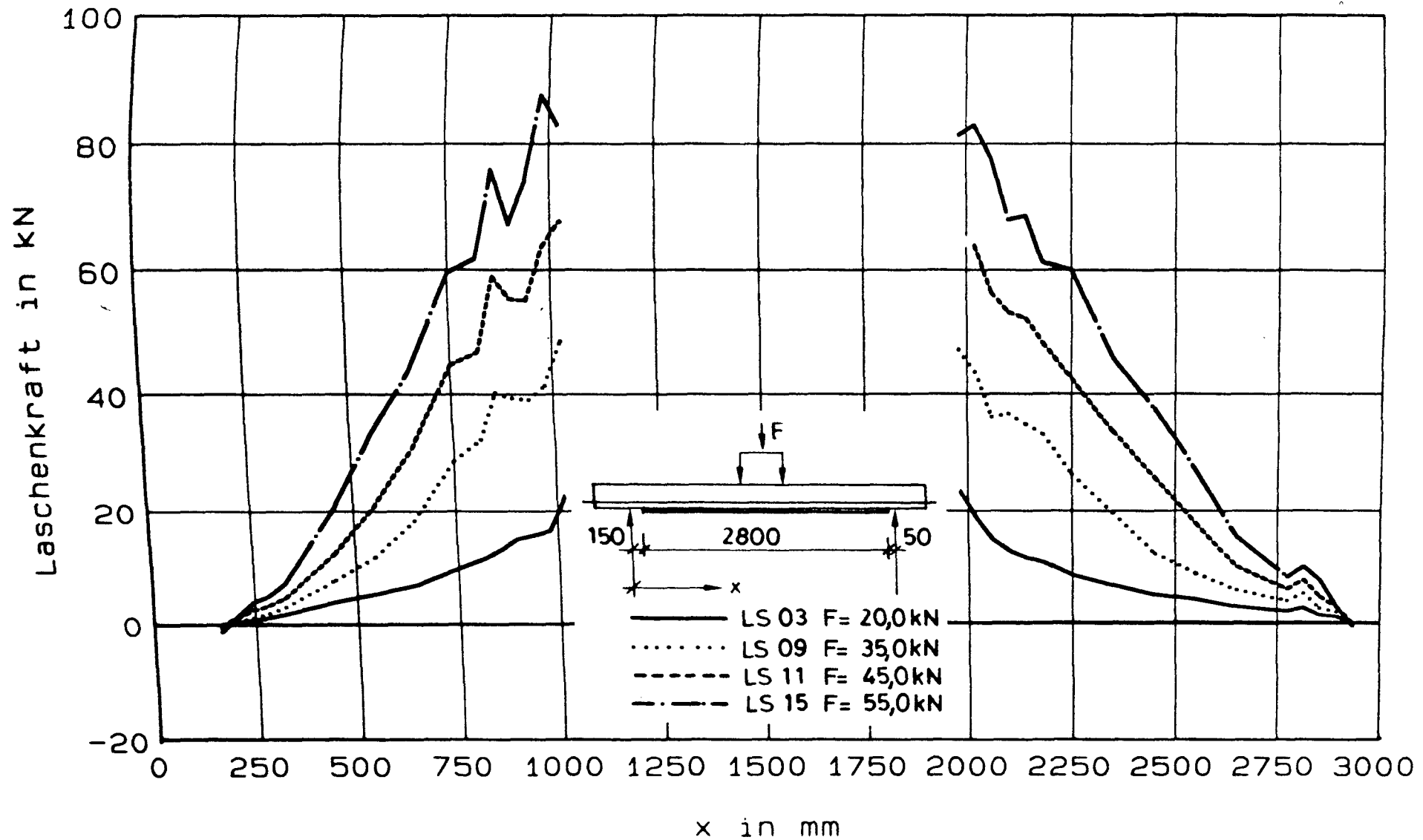


Bild 8.100 : Laschenkraft - Balken DB08, LF1

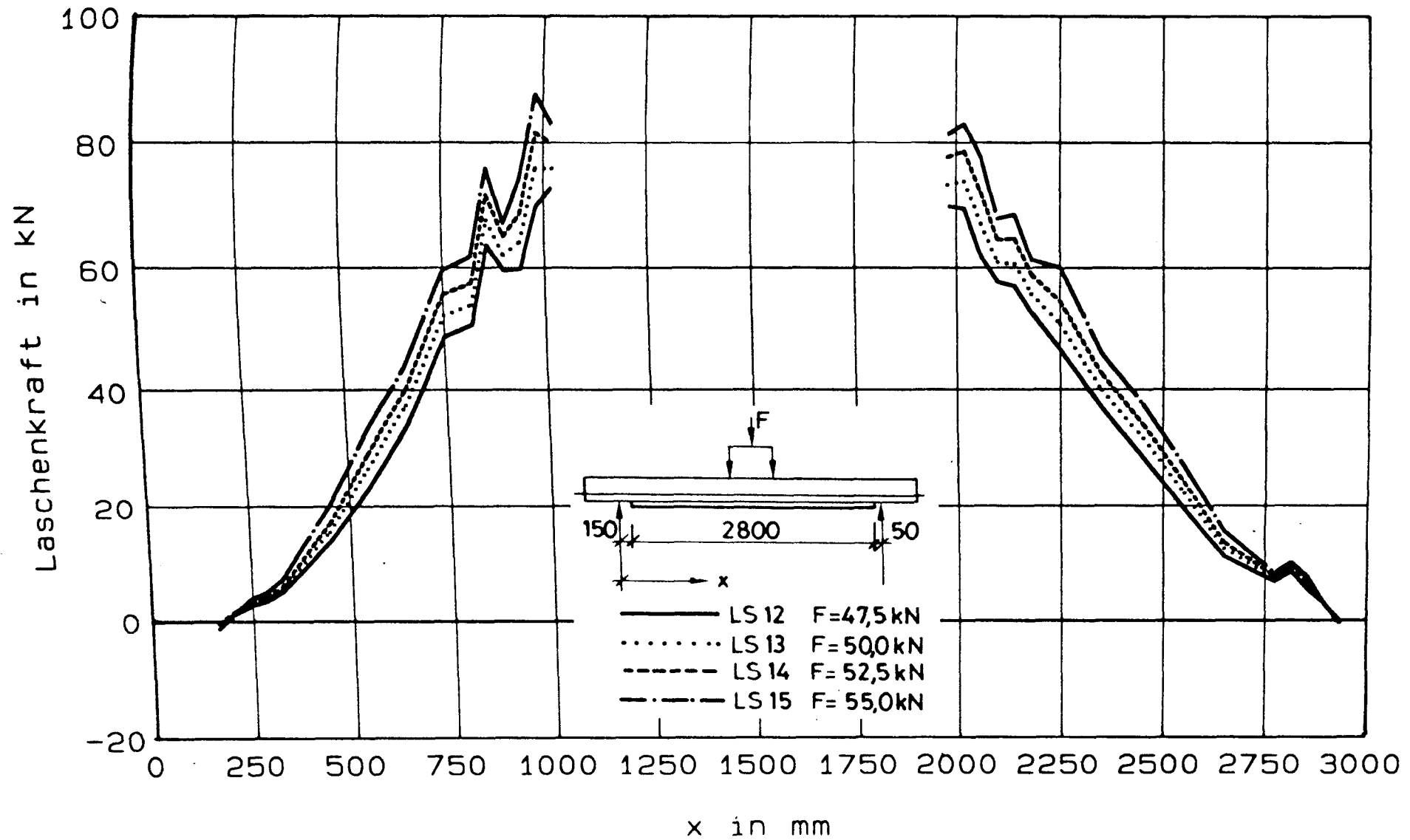


Bild 8.101 : Laschenkraft - Balken DB08. LF1

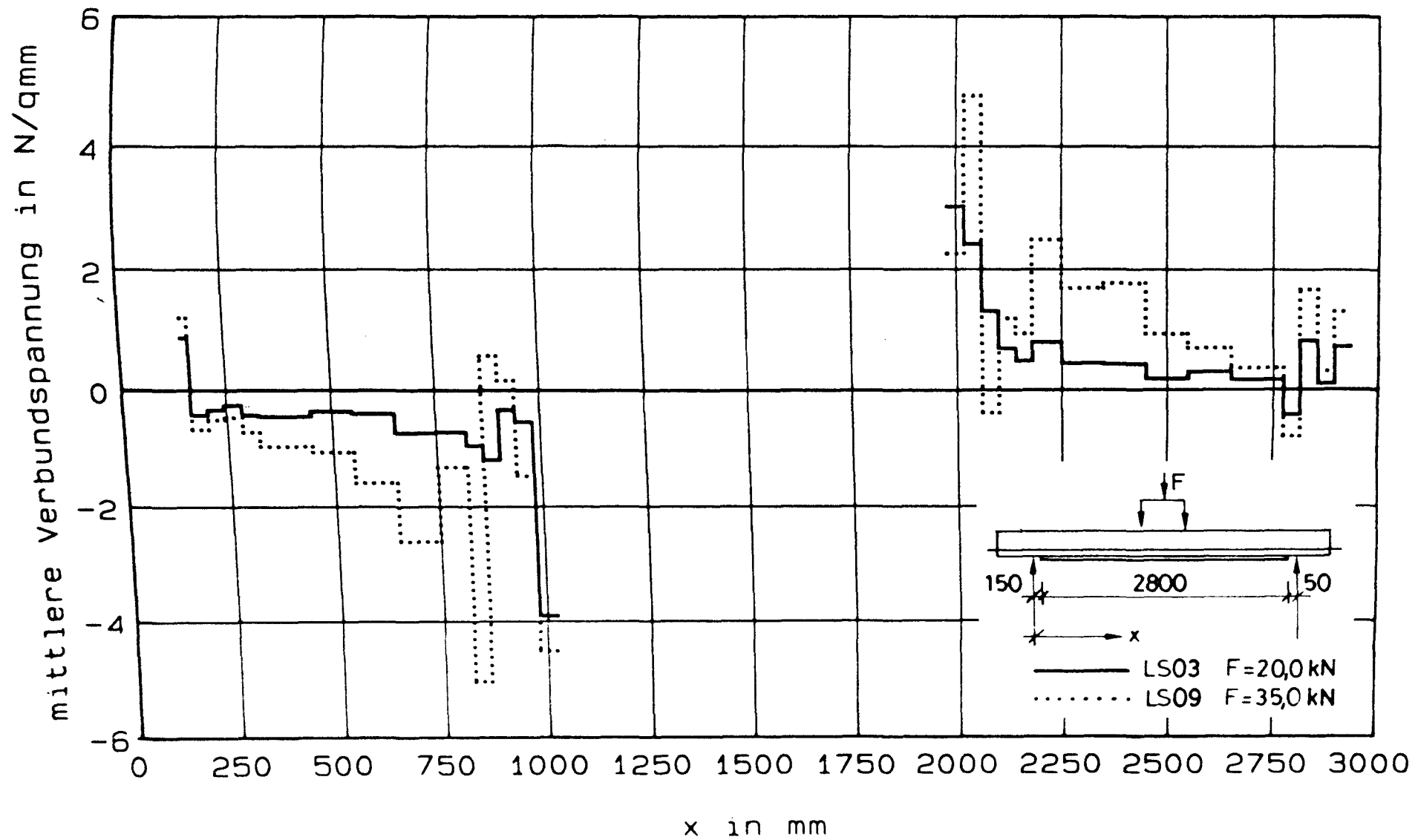


Bild 8.102 : mittlere Verbundspannung - Balken DB08, LF1

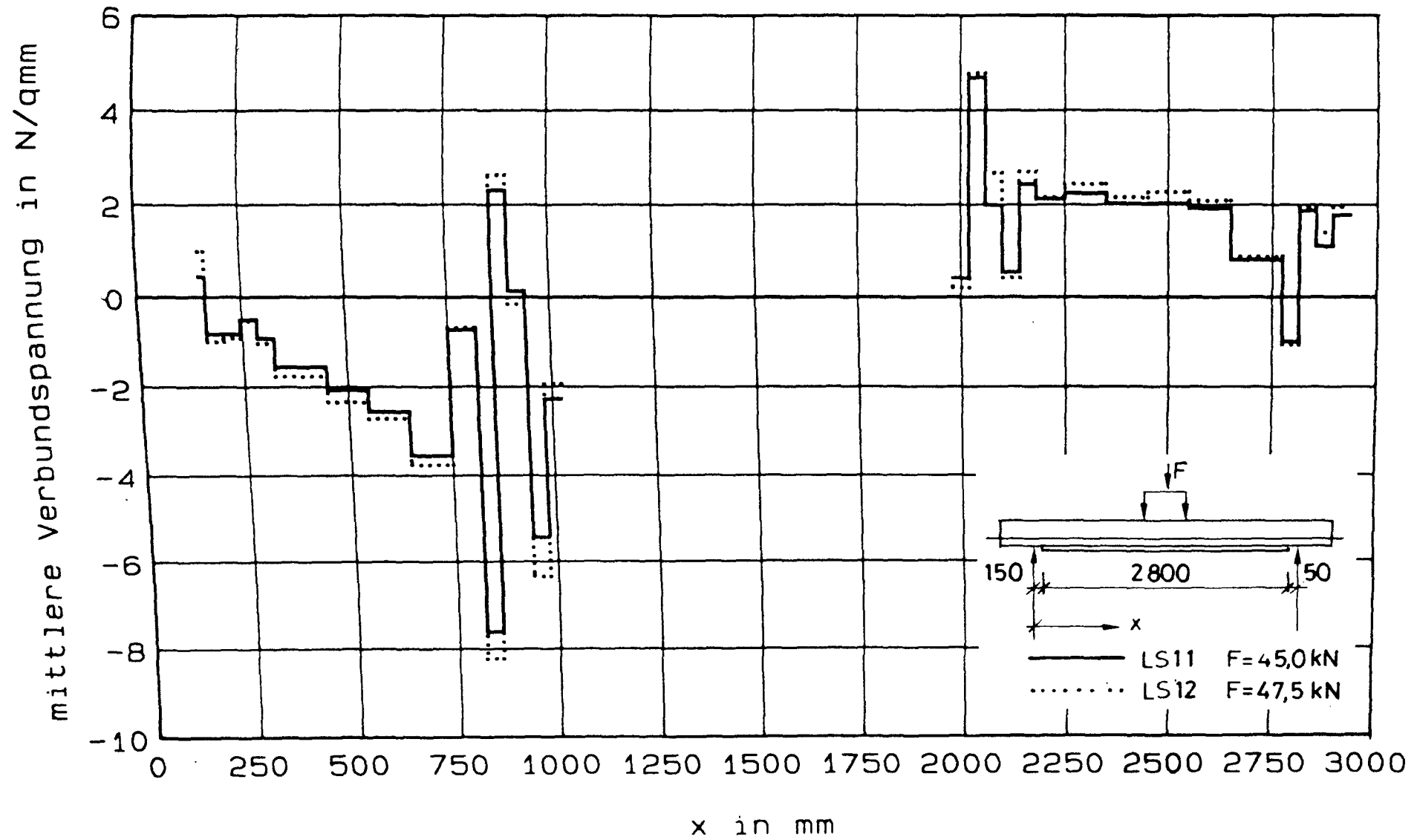


Bild 8.103 : mittlere Verbundspannung - Balken DB08, LF1

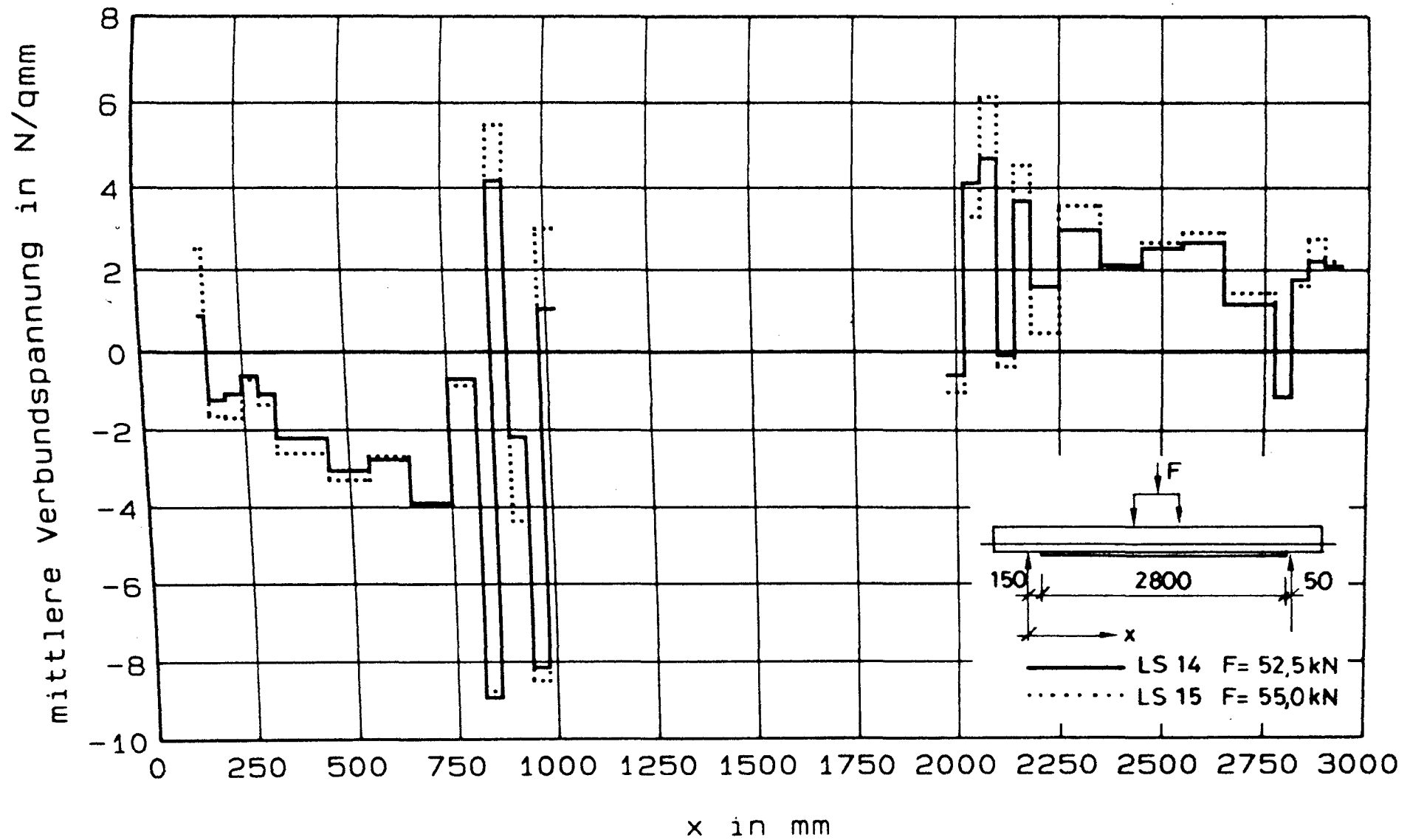


Bild 8.104 : mittlere Verbundspannung - Balken DB08, LF1

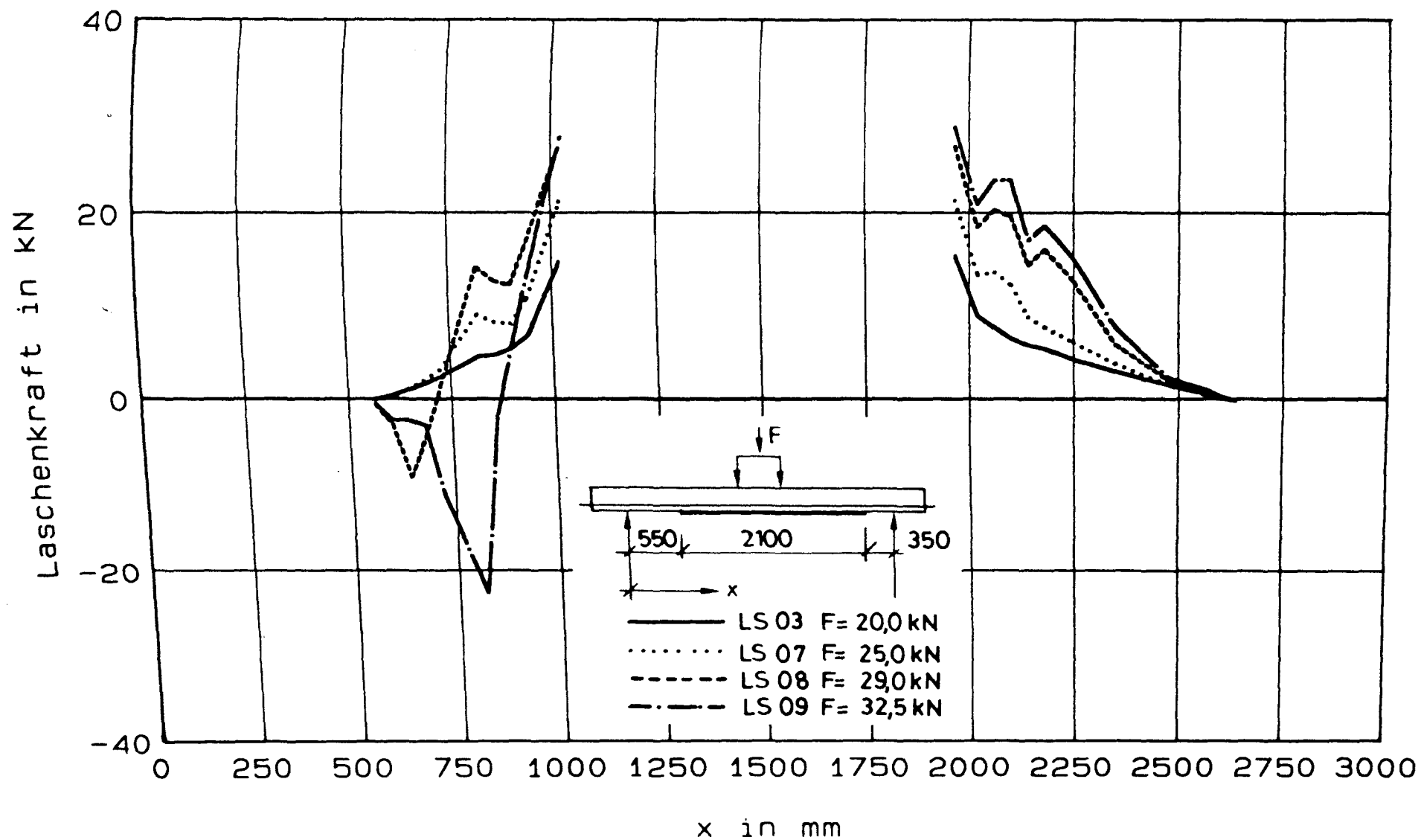


Bild 8.105 : Laschenkraft - Balken DB09, LF1

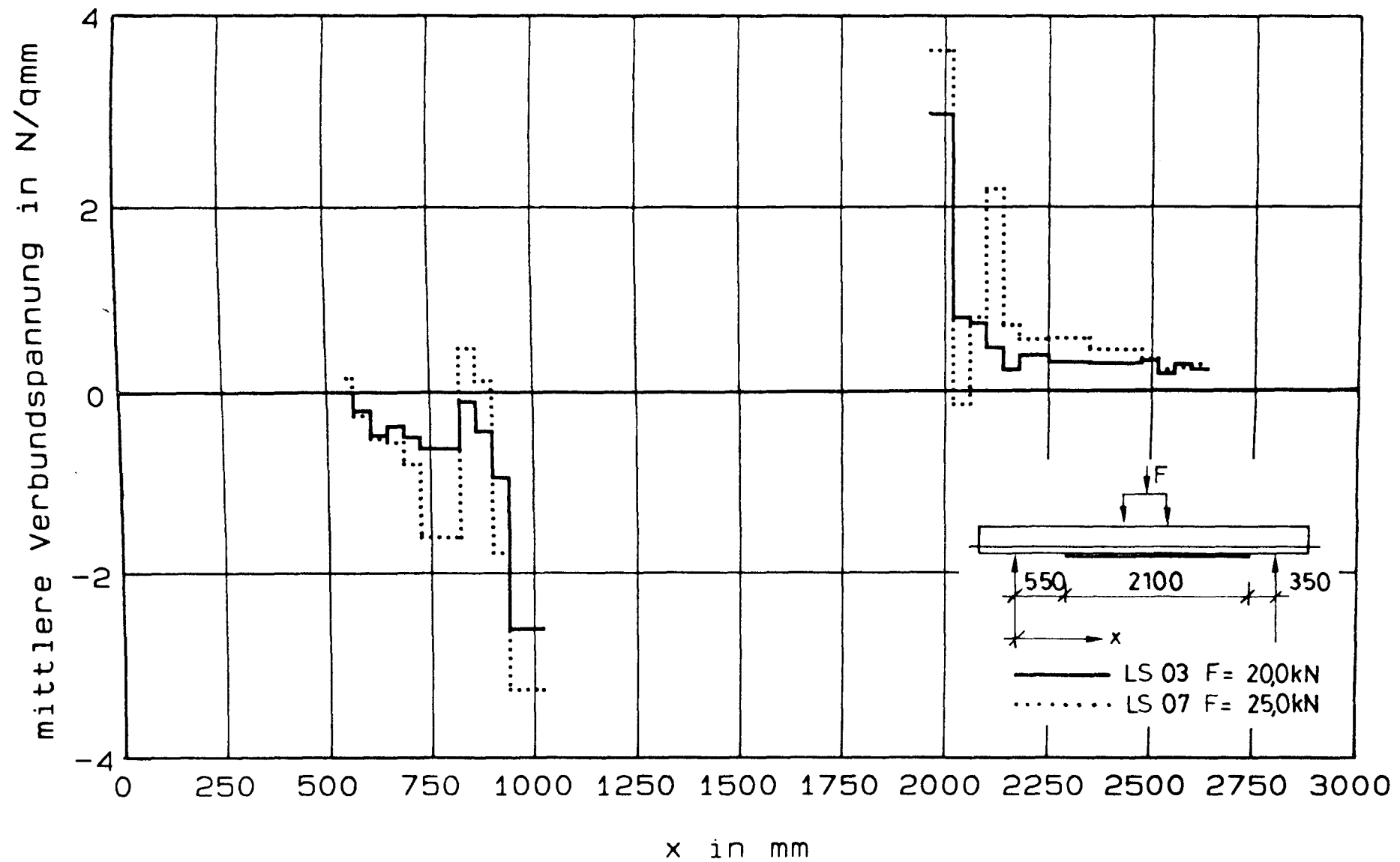


Bild 8.106 : mittlere Verbundspannung - Balken DB09, LF1

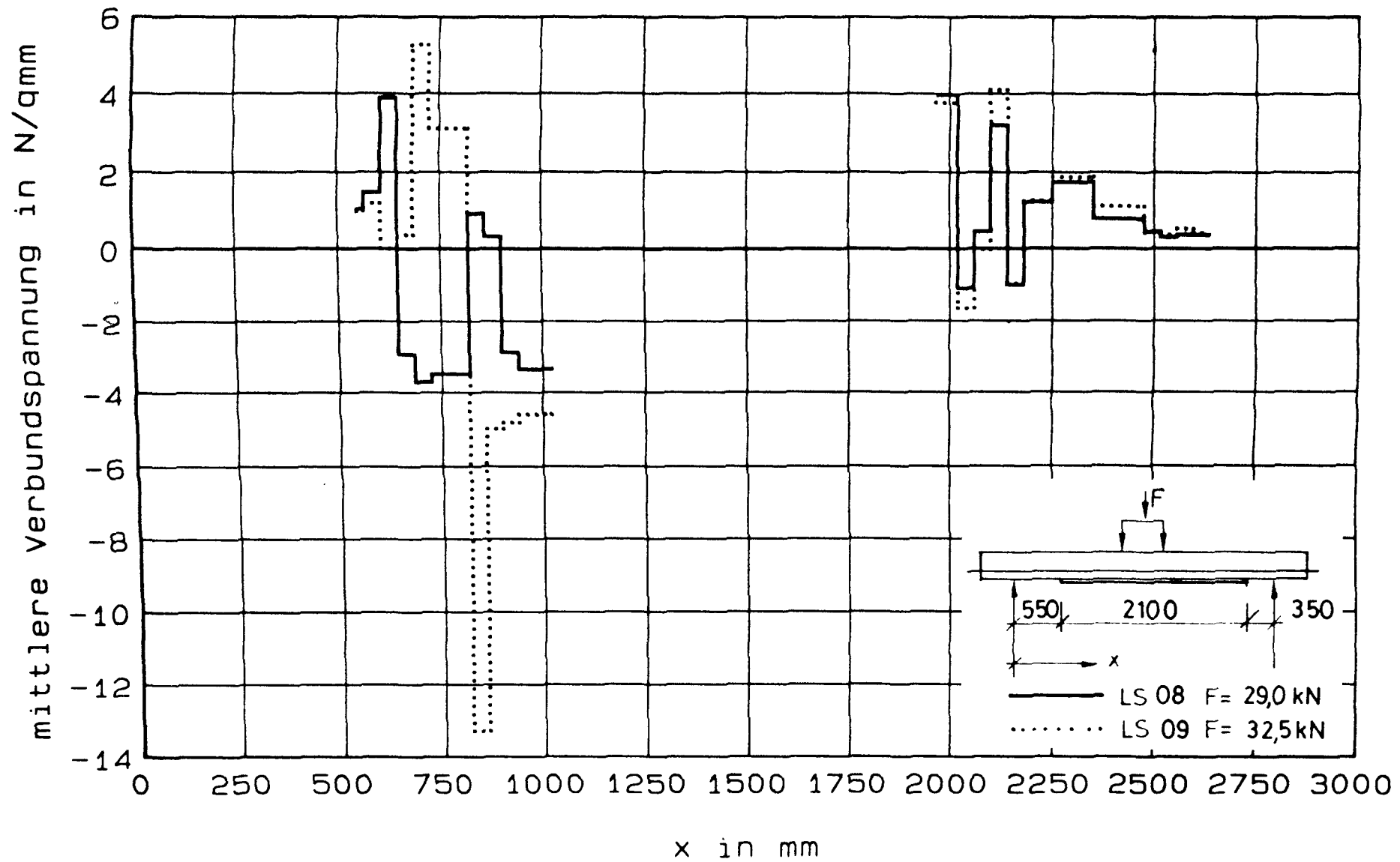


Bild 8.107 : mittlere Verbundspannung - Balken DB09, LF1

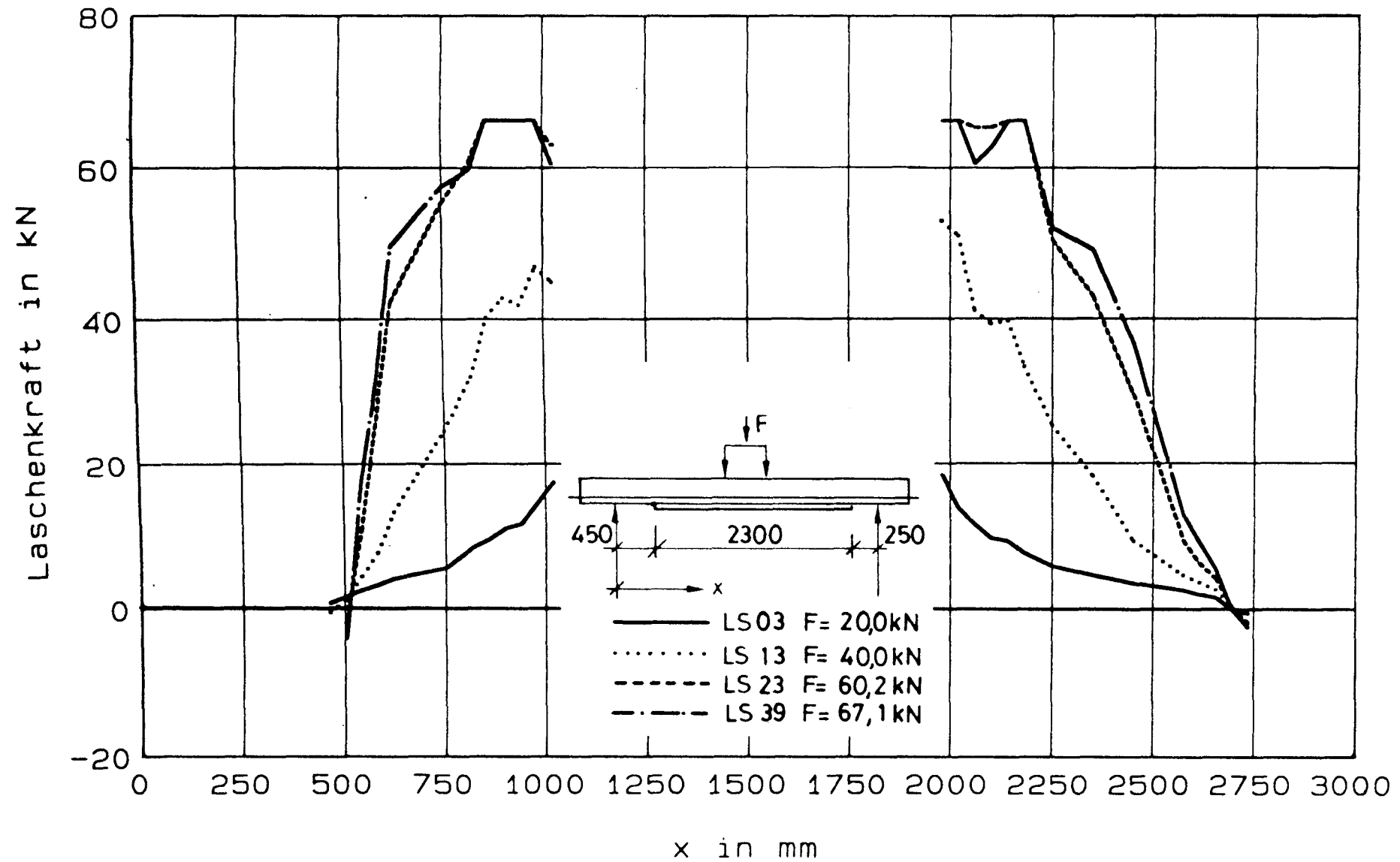


Bild 8.108 : Laschenkraft - Balken DB10, LF1

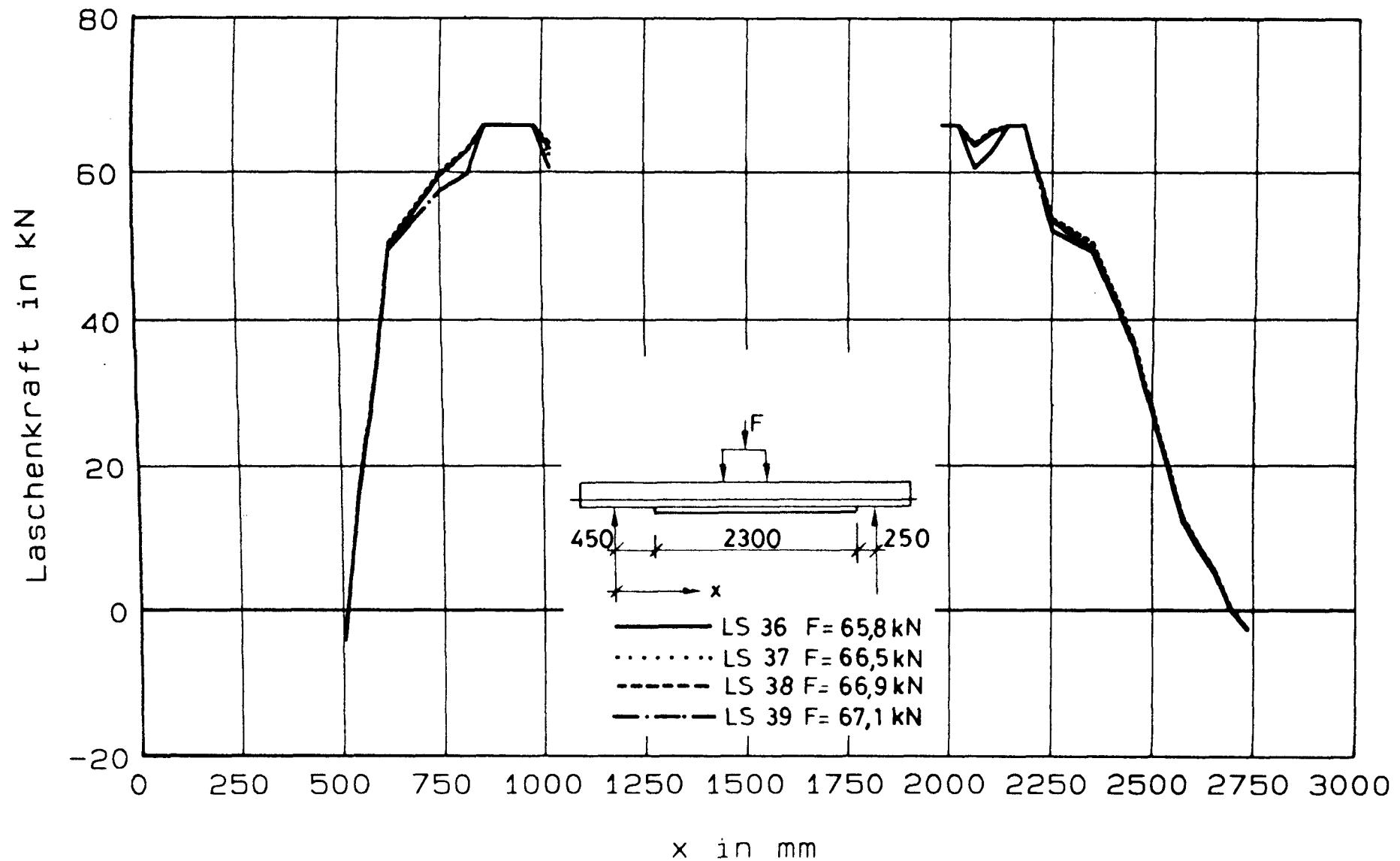


Bild 8.109 : Laschenkraft - Balken DB10, LF1

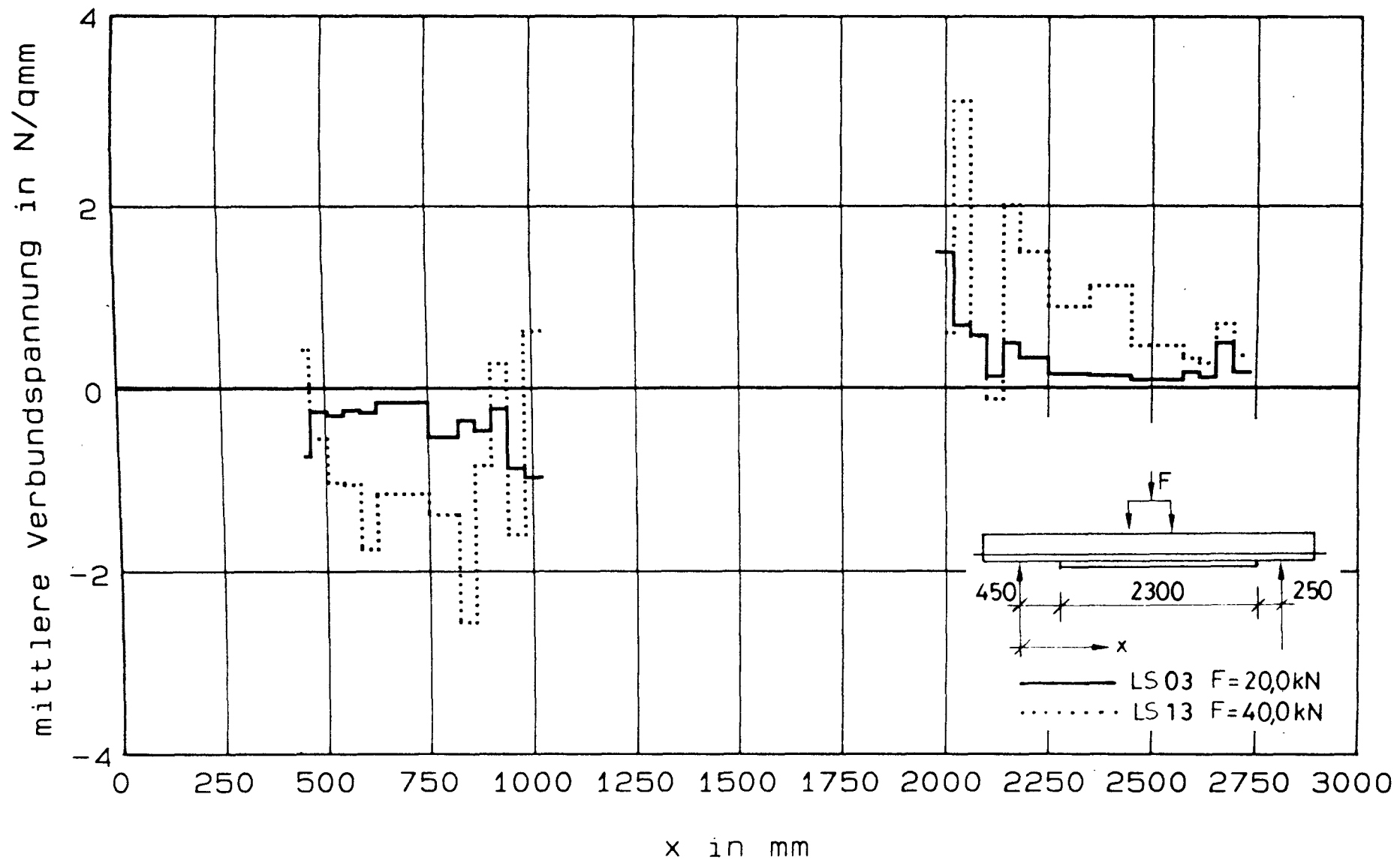


Bild 8.110 : mittlere Verbundspannung - Balken DB10. LF1

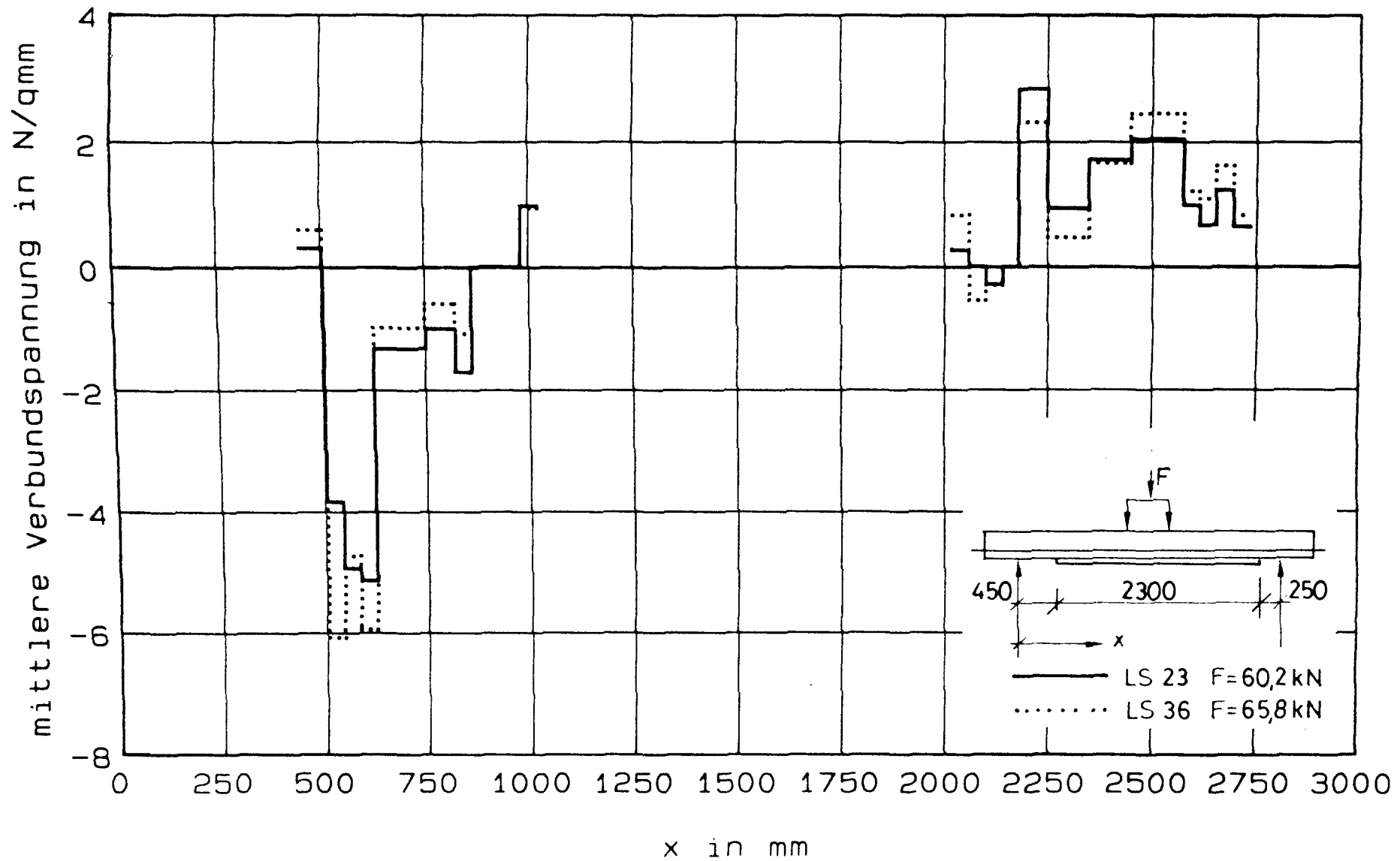


Bild 8.111 : mittlere Verbundspannung - Balken DB10. LF1

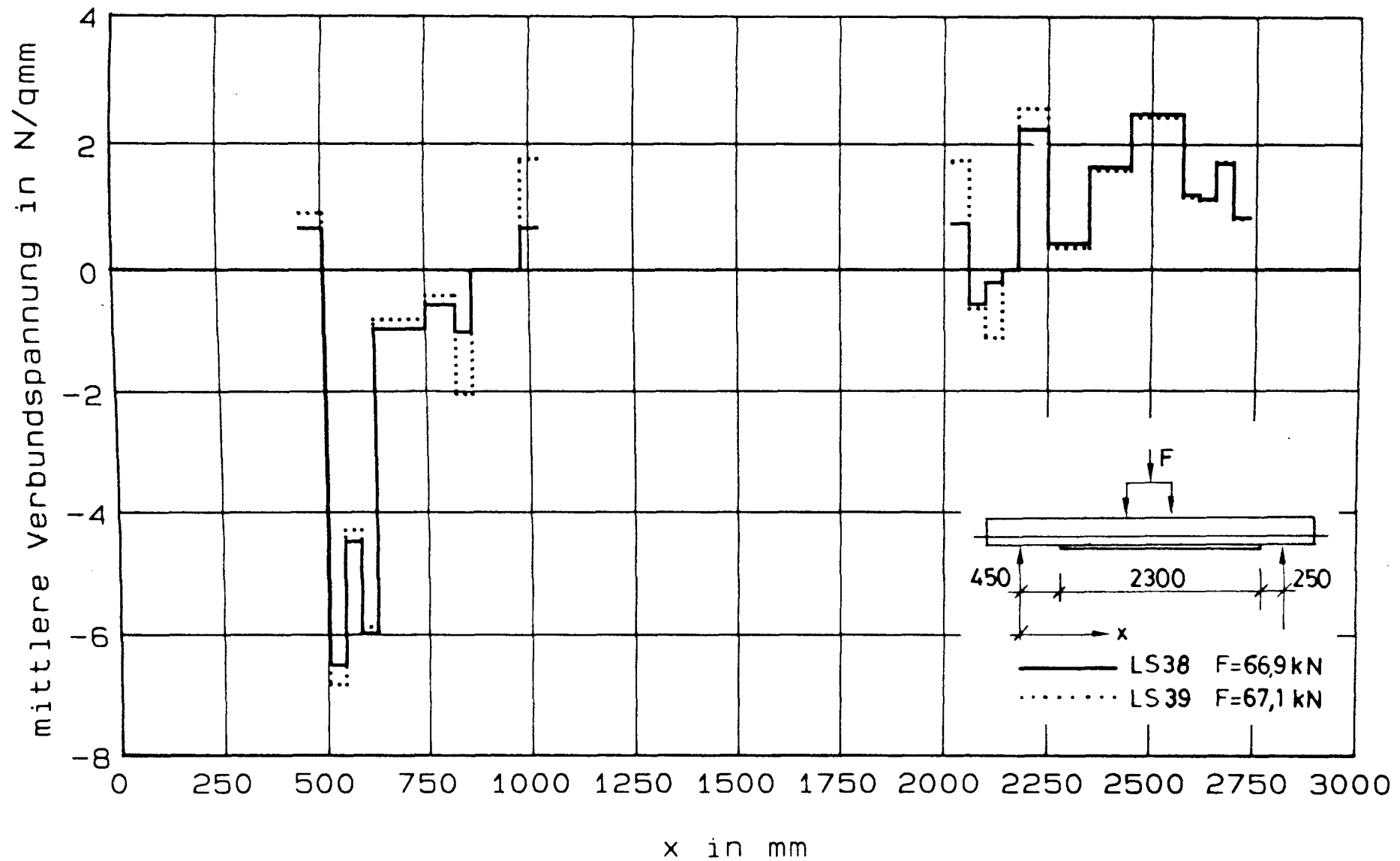


Bild 8.112 : mittlere Verbundspannung - Balken DB10, LF1

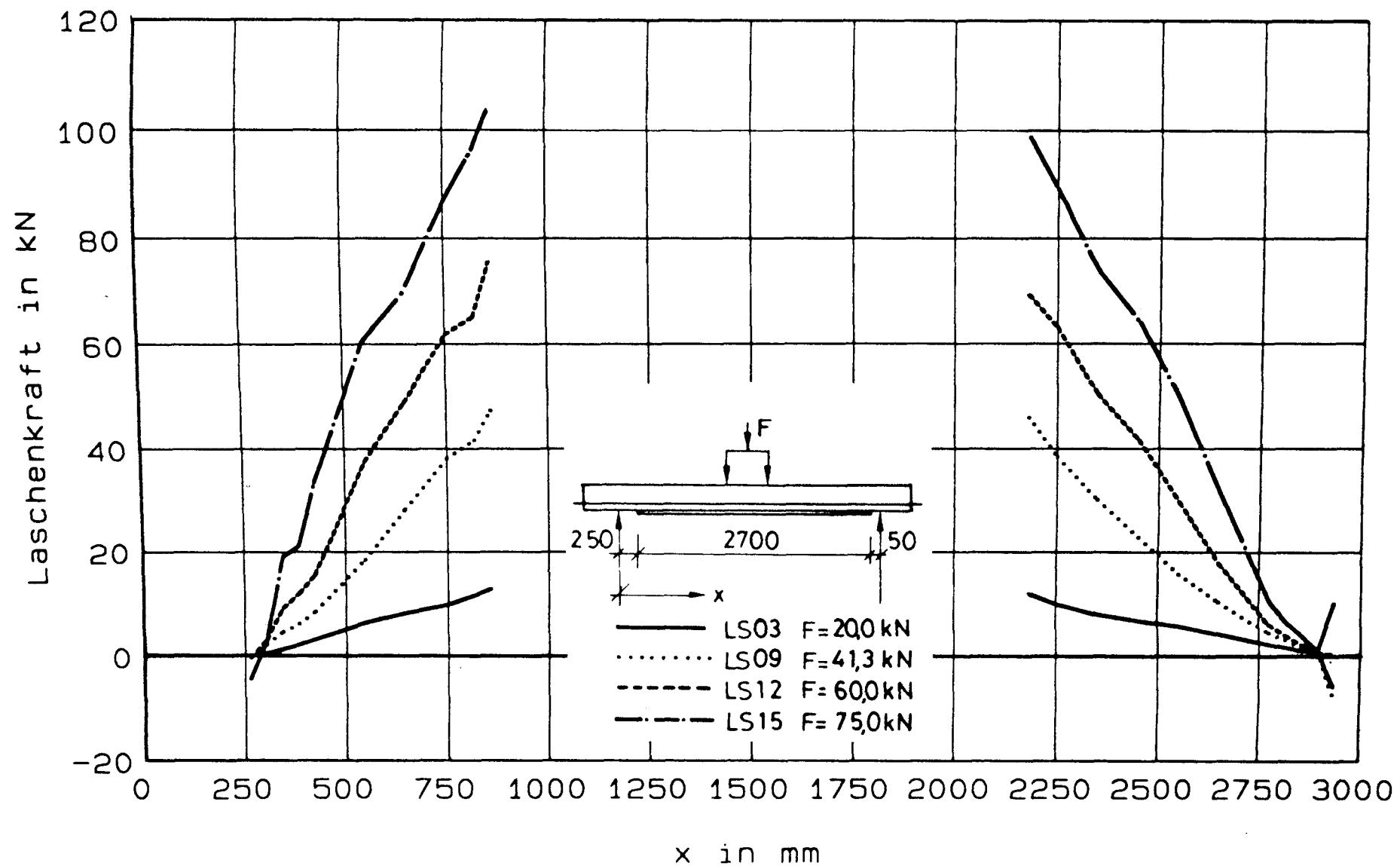


Bild 8.113 : Laschenkraft - Balken SB01, LF1

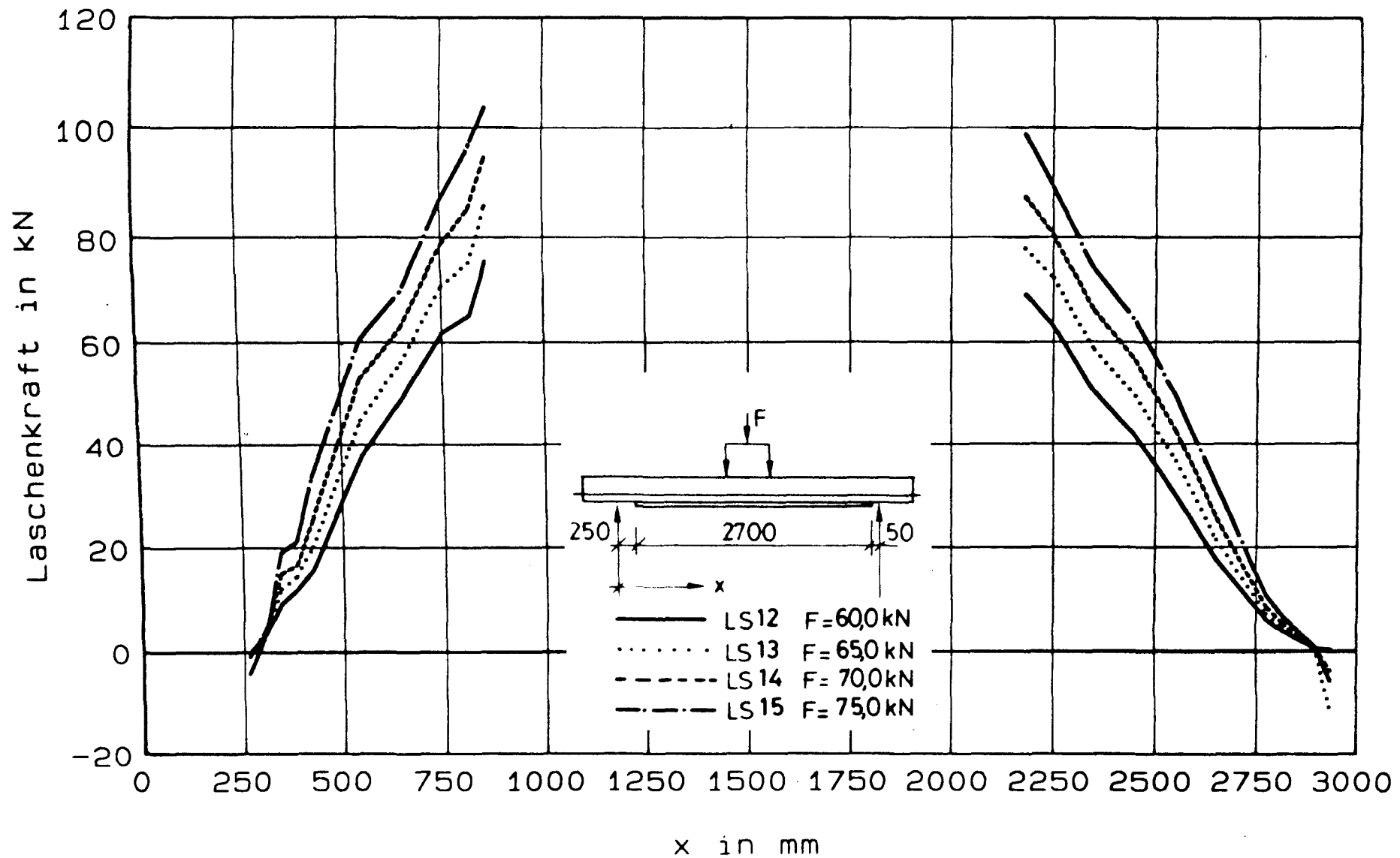


Bild 8.114 : Laschenkraft - Balken SB01, LF1

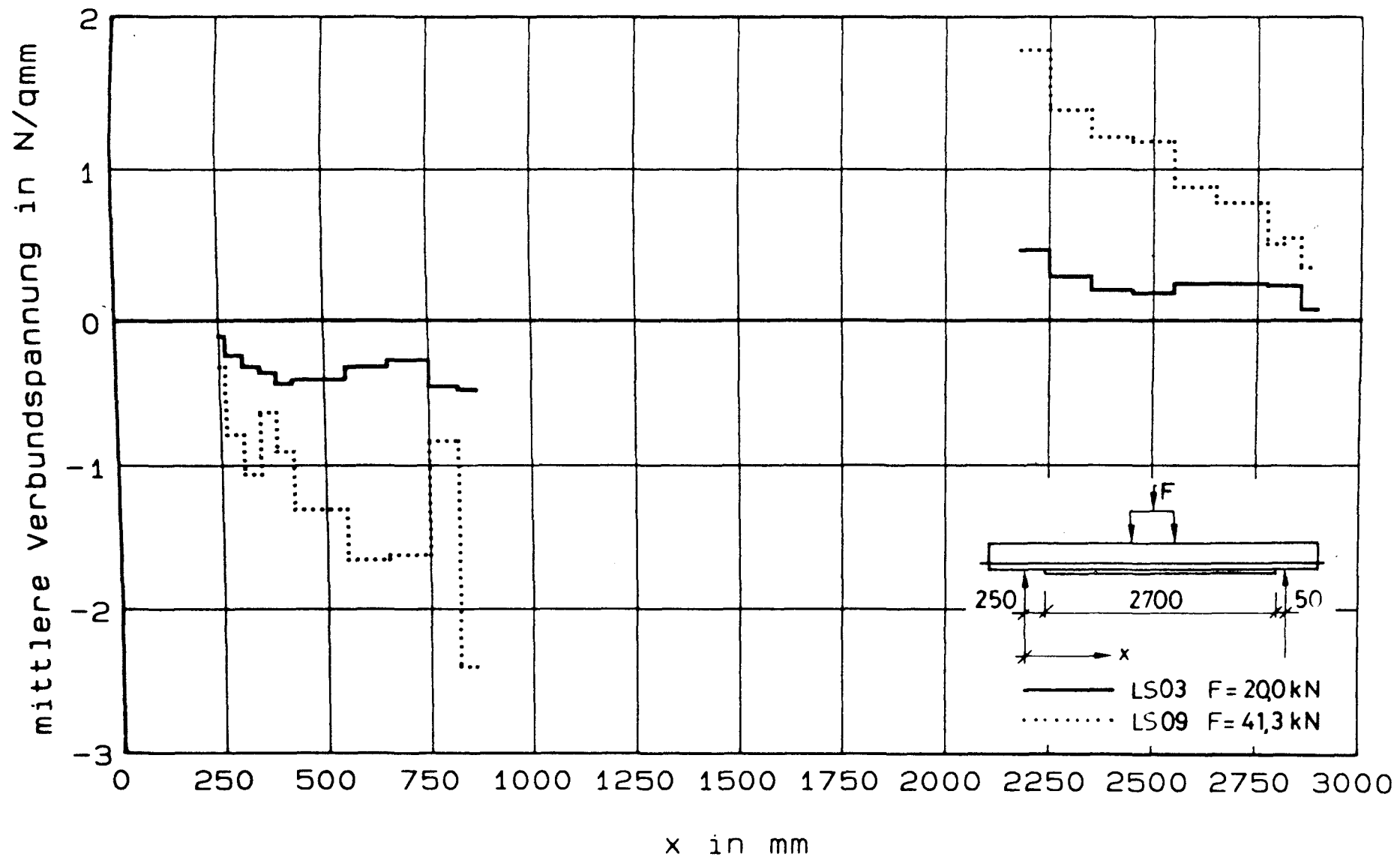


Bild 8.115 : mittlere Verbundspannung - Balken SB01, LF1

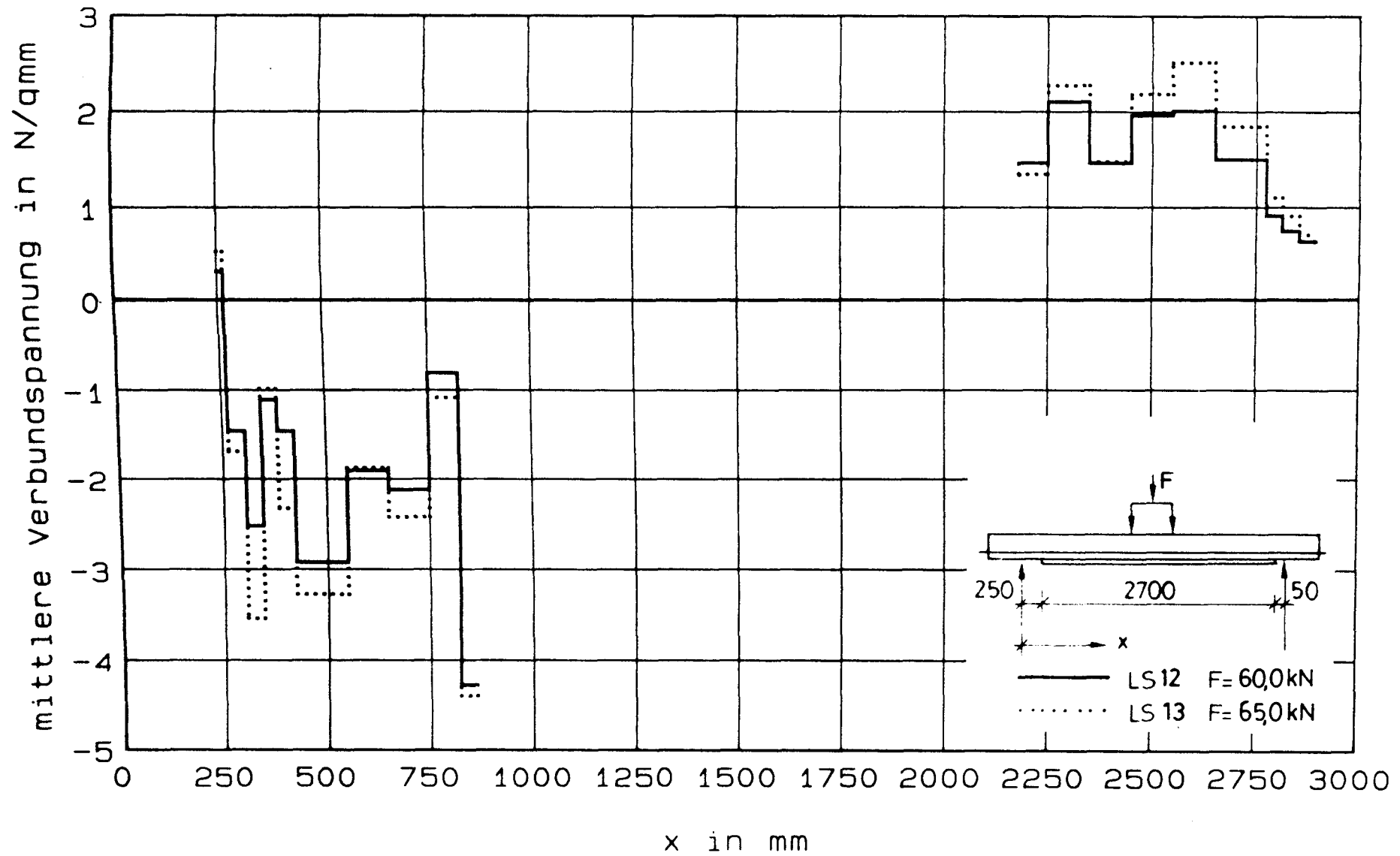


Bild 8.116 : mittlere Verbundspannung - Balken SB01, LF1

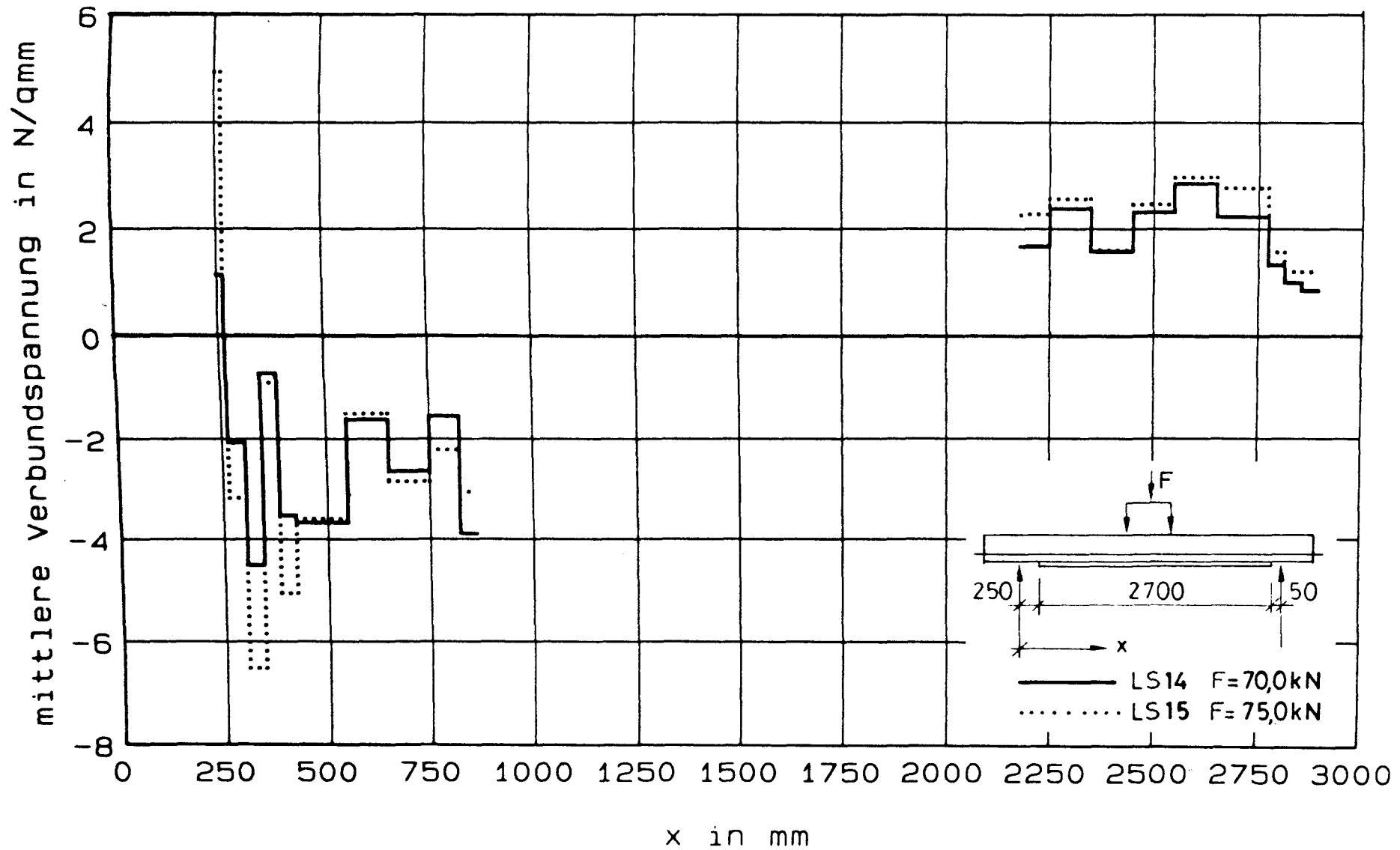


Bild 8.117 : mittlere Verbundspannung - Balken SB01, LF1

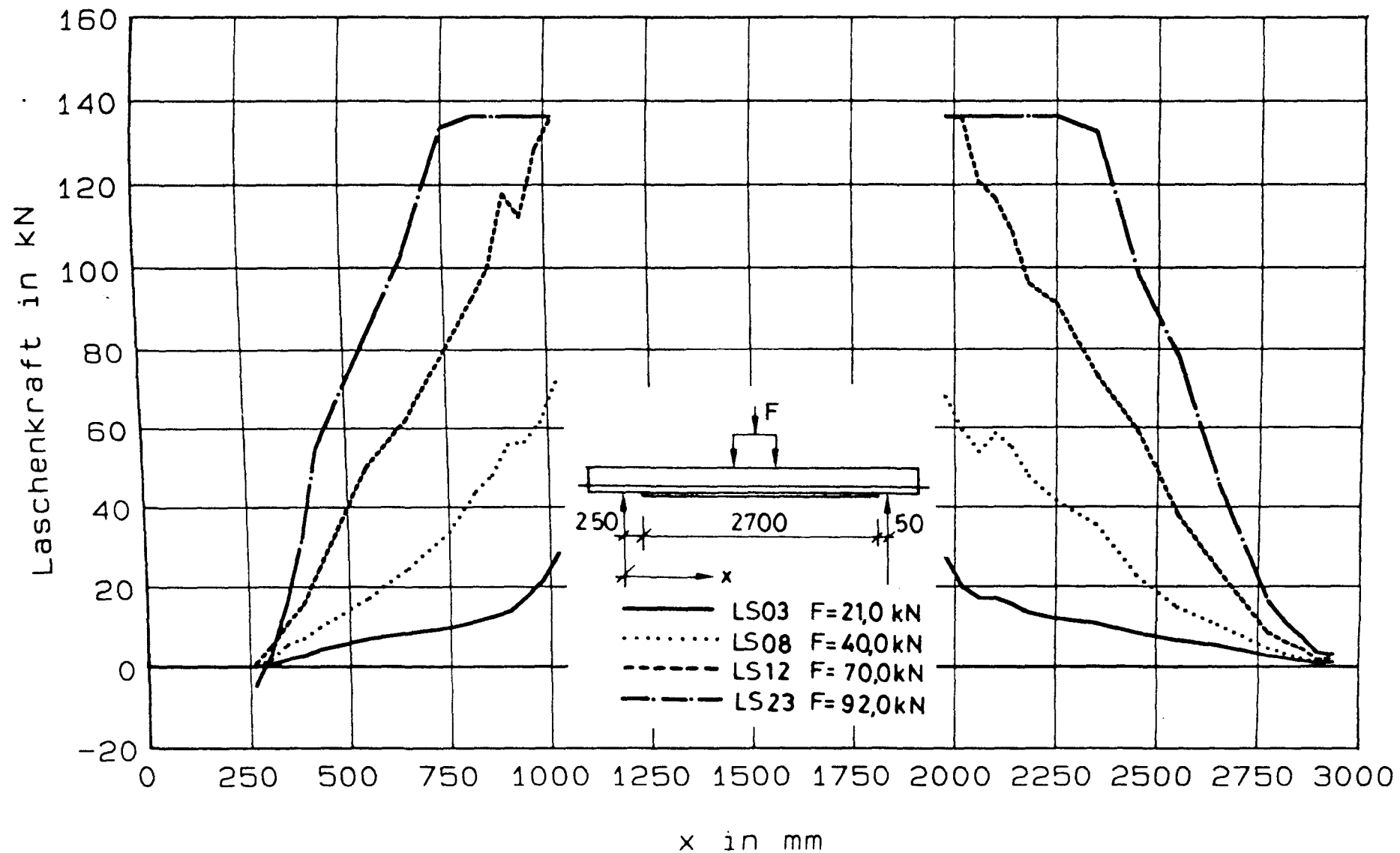


Bild 8.118 : Laschenkraft - Balken SB02, LF1

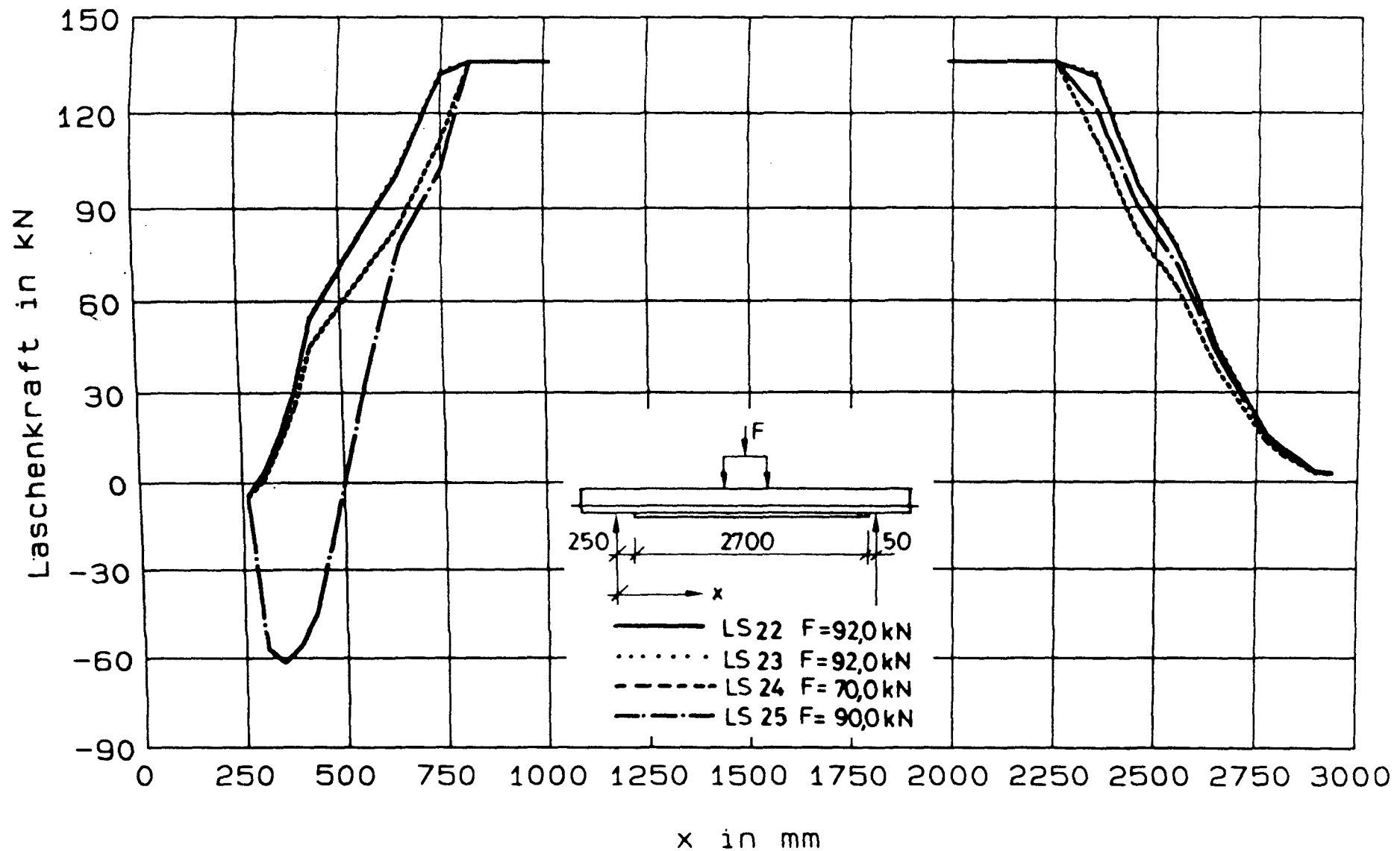


Bild 8.119 : Laschenkraft - Balken SB02, LF1

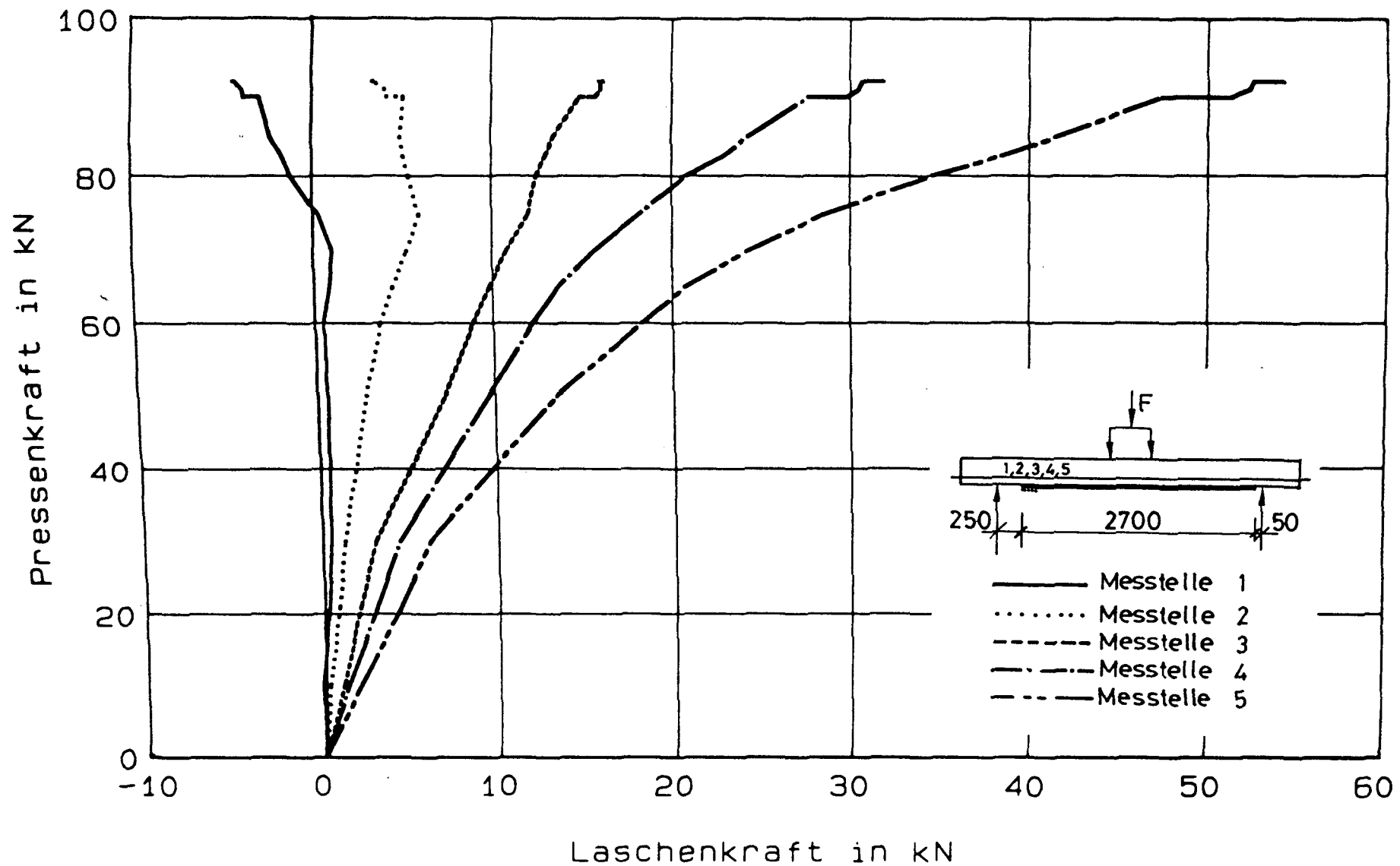


Bild 8.120 : Laschenkraft in Abhaengigkeit von der Pressenkraft - Balken SB02, LF1

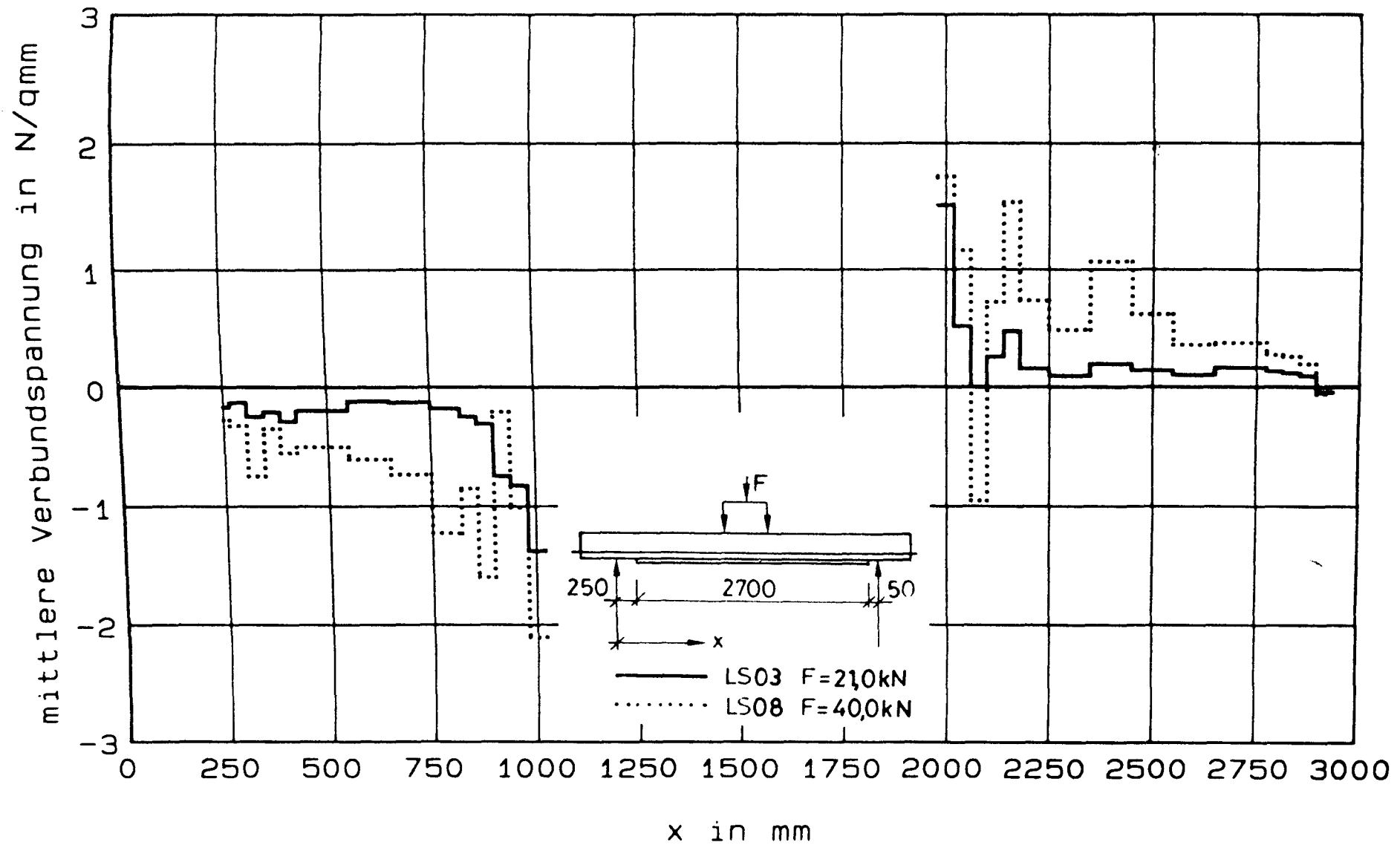


Bild 8.121 : mittlere Verbundspannung - Balken SB02, LF 1

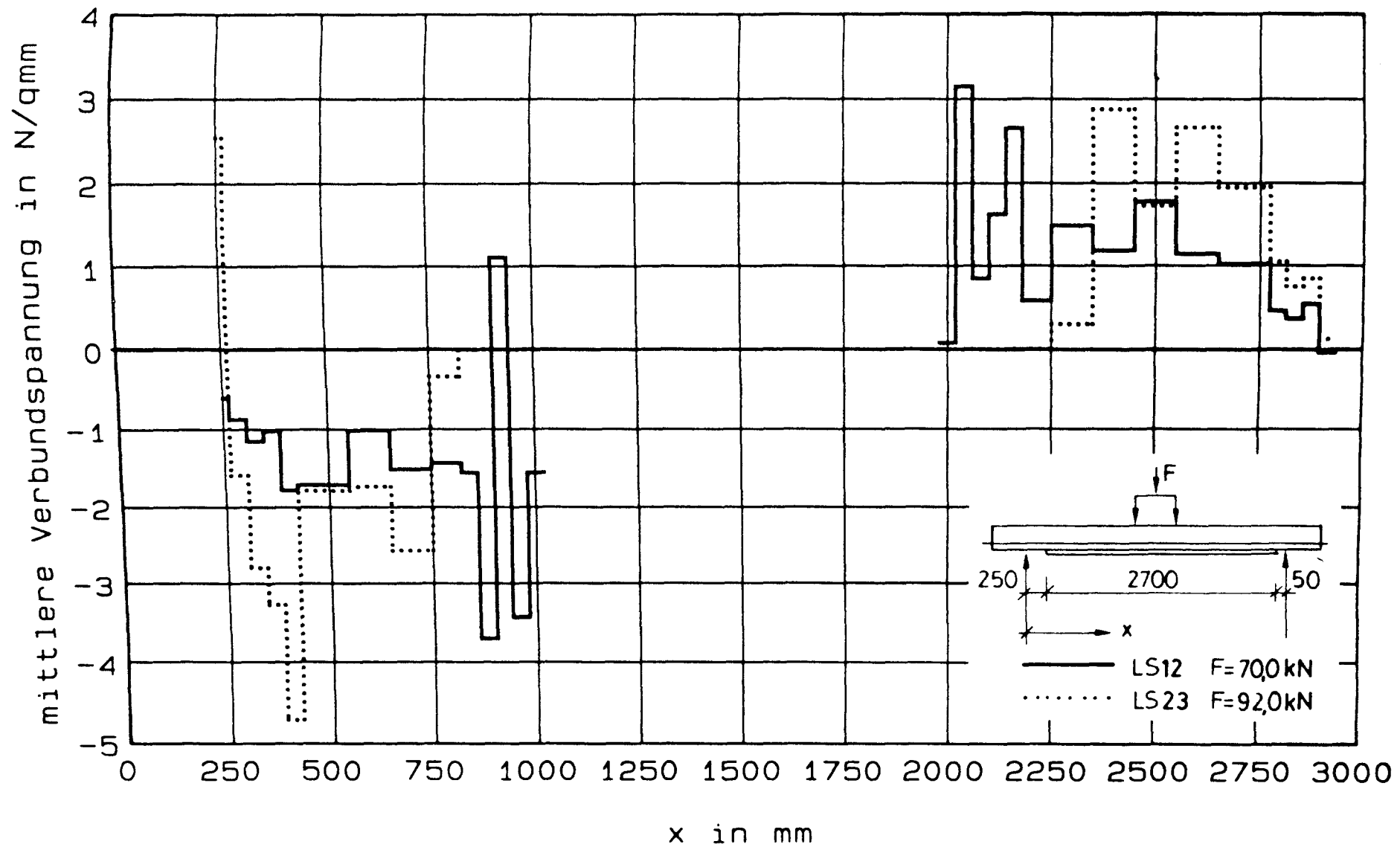


Bild 8.122 : mittlere Verbundspannung - Balken SB02, LF1

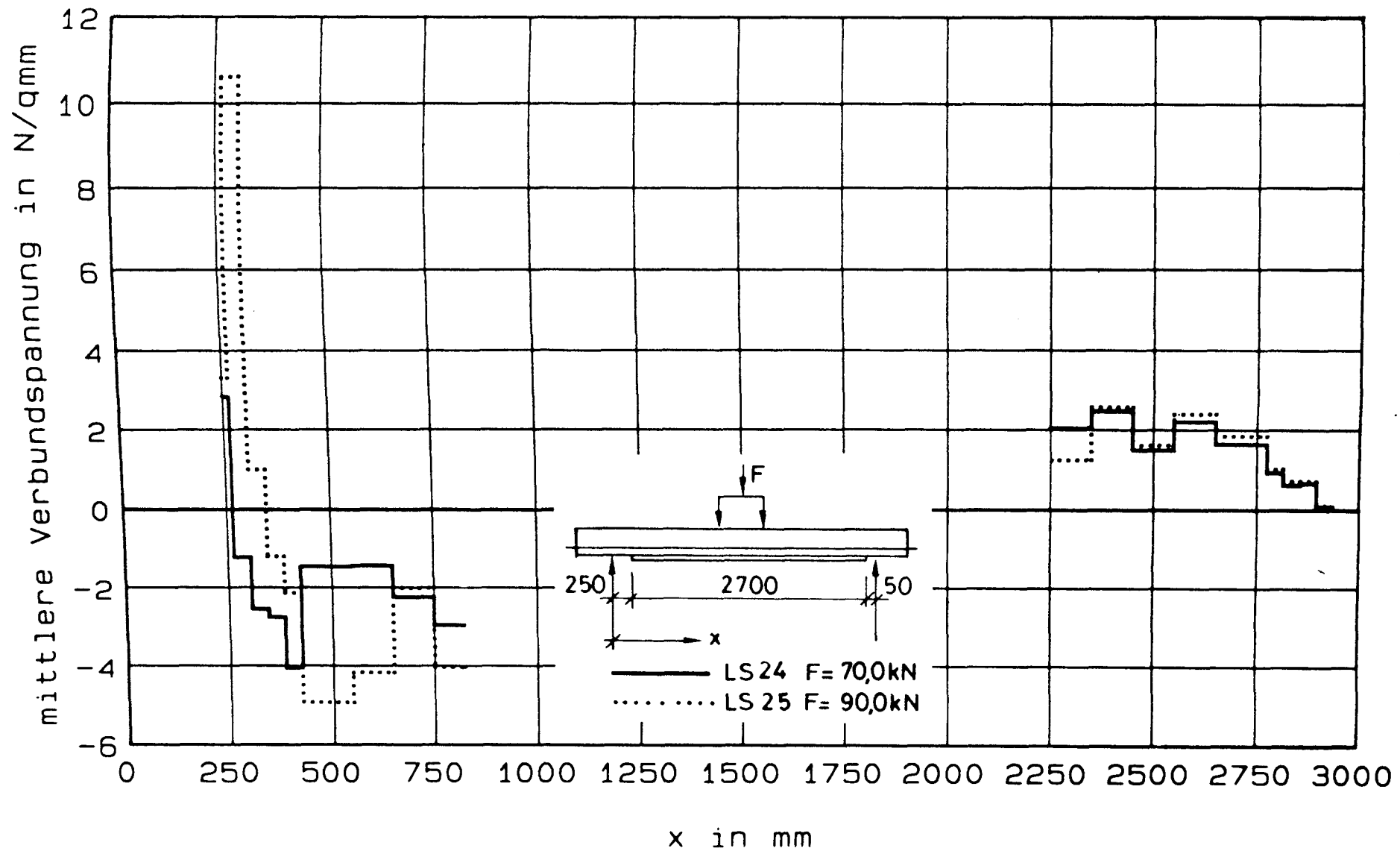


Bild 8.123 : mittlere Verbundspannung - Balken SB02, LF1

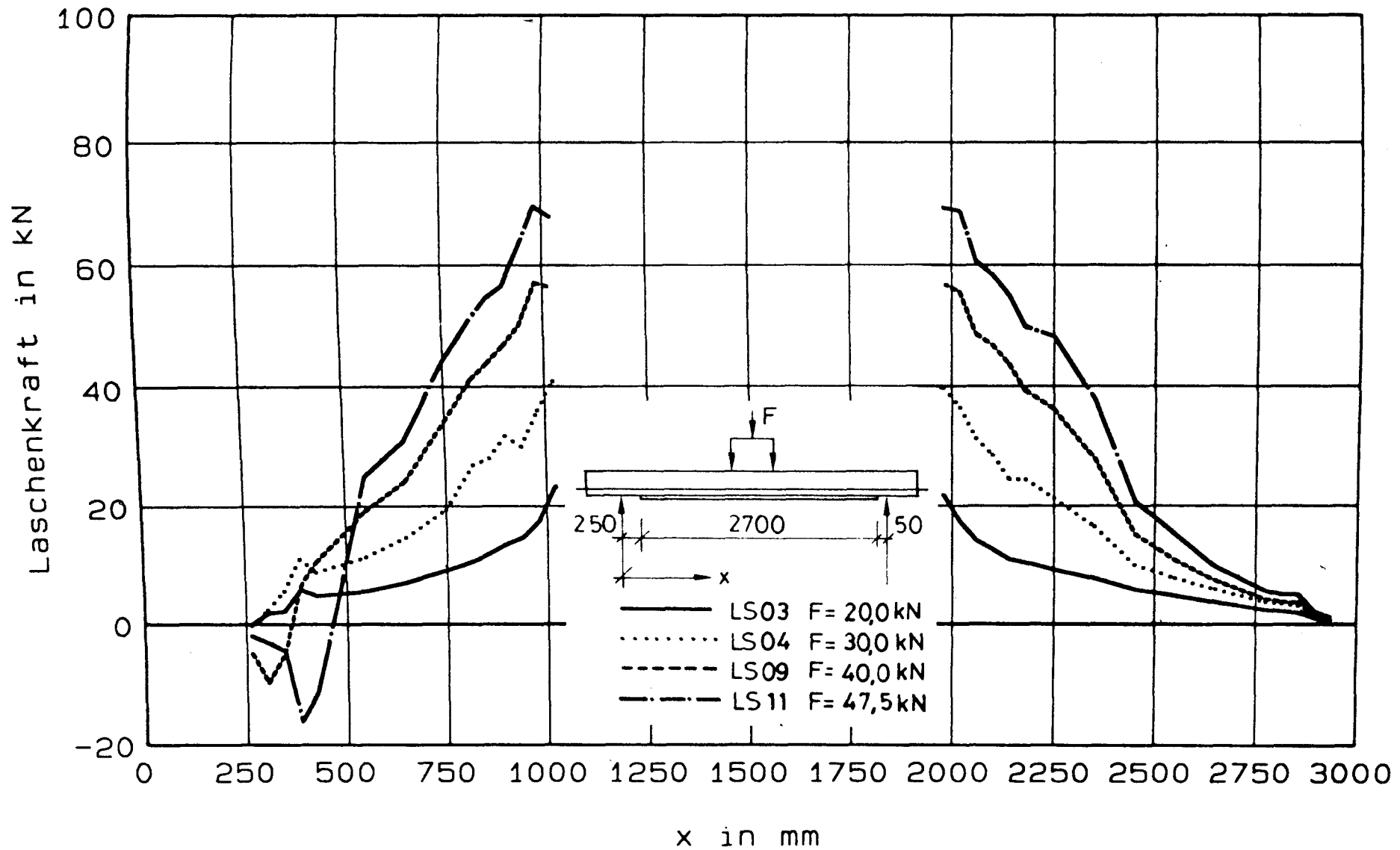


Bild 8.124 : Laschenkraft - Balken SB03, LF1

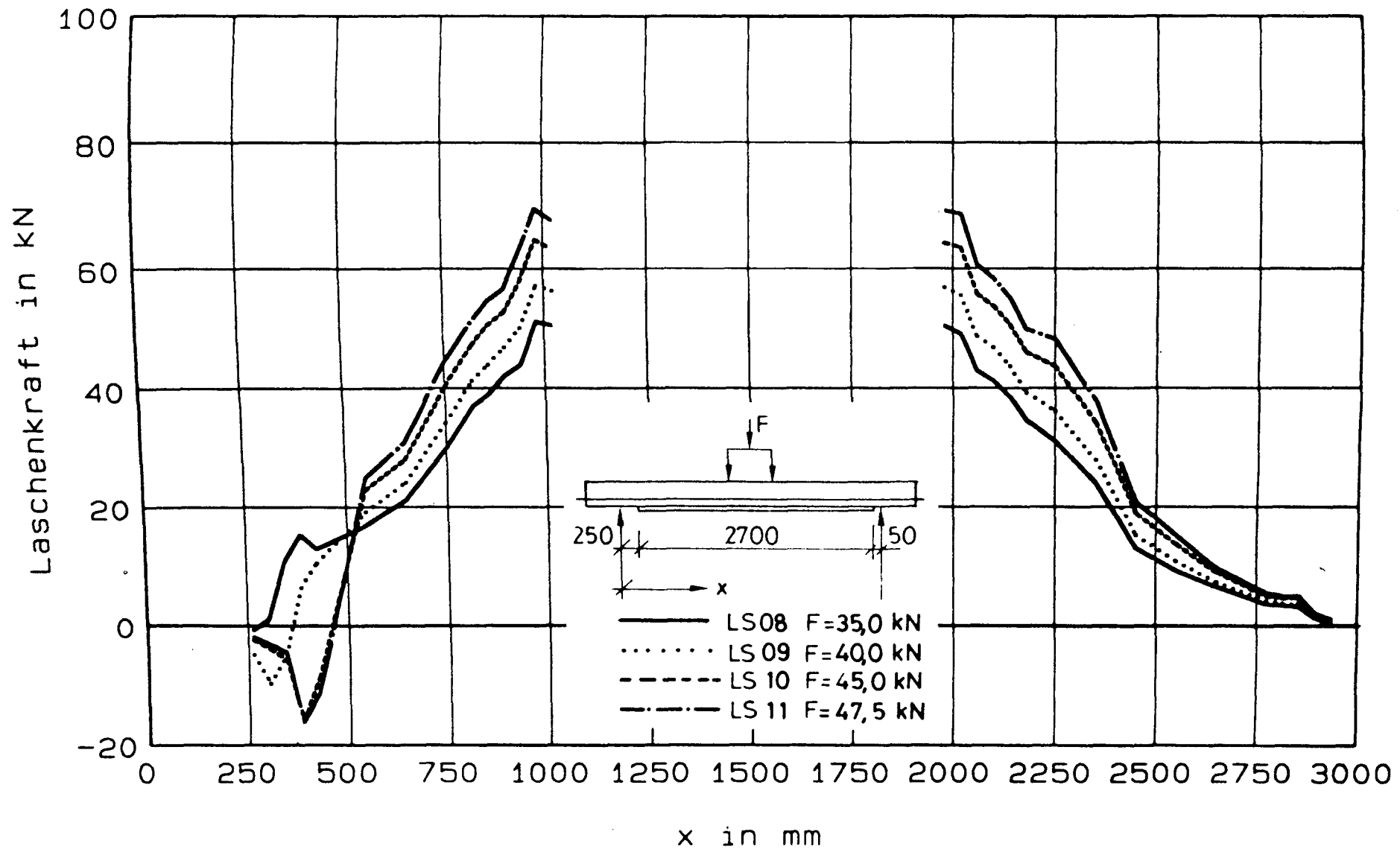


Bild 8.125 : Laschenkraft - Balken SB03, LF1

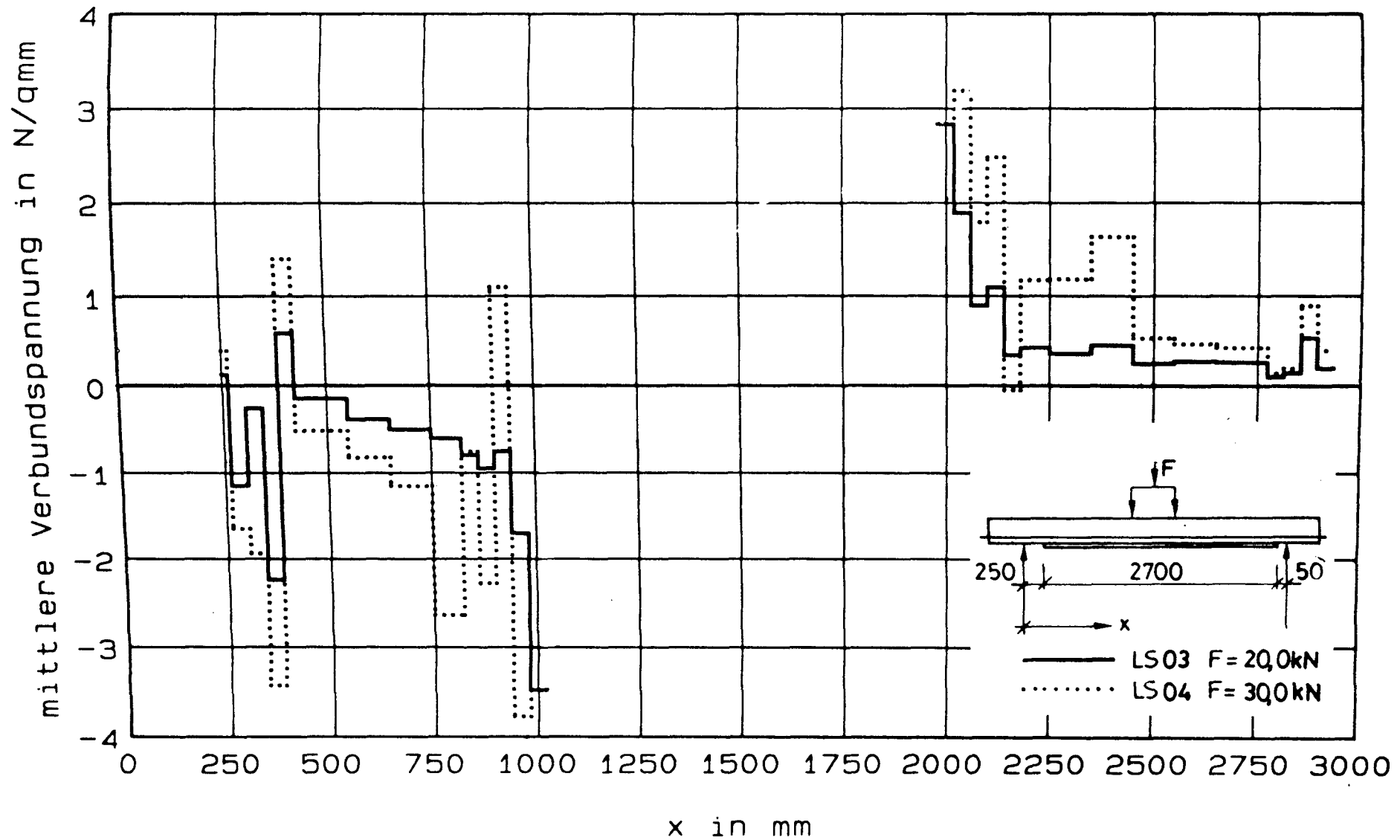


Bild 8.126 : mittlere Verbundspannung - Balken SB03, LF1

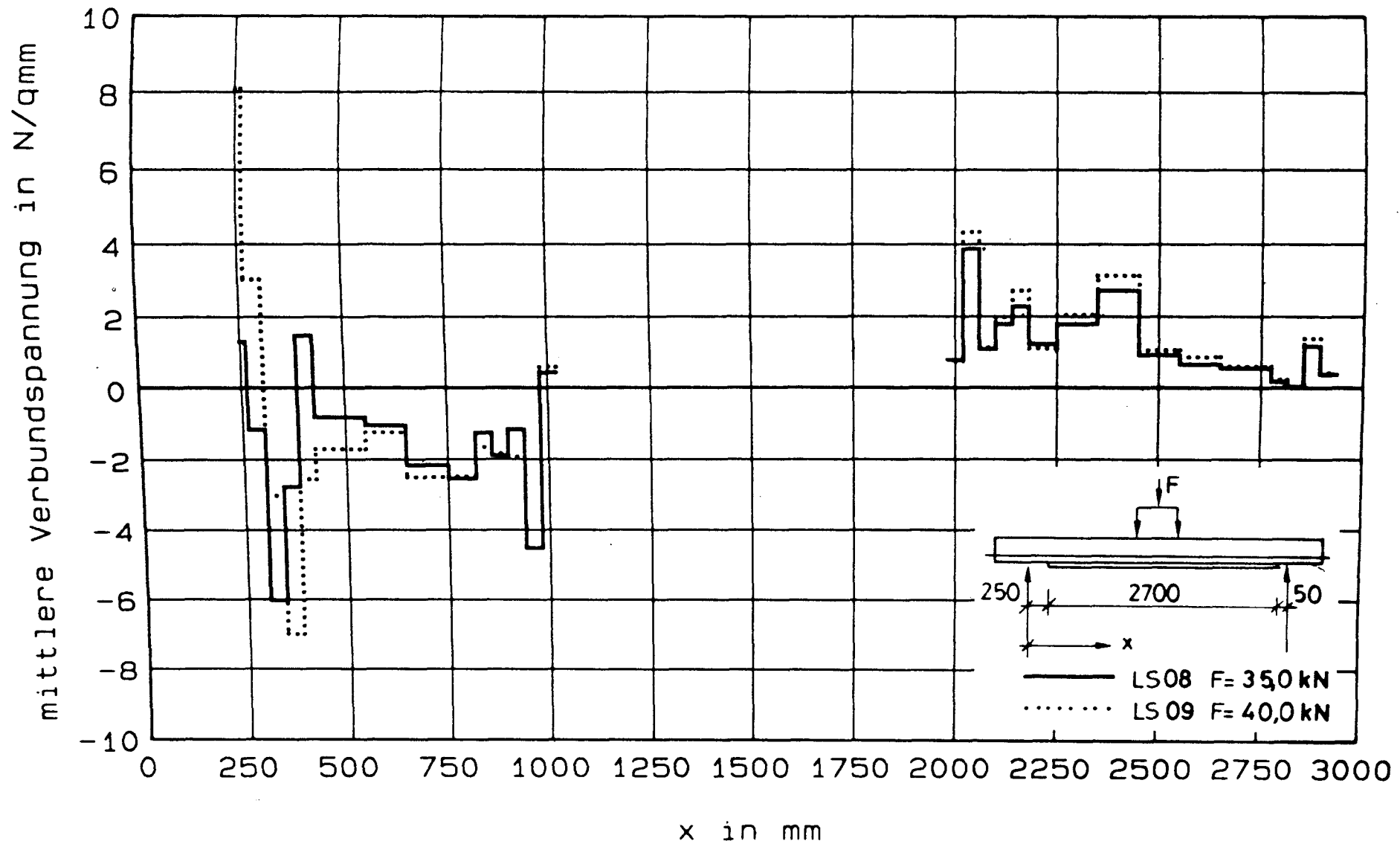


Bild 8.127 : mittlere Verbundspannung - Balken SB03, LF1

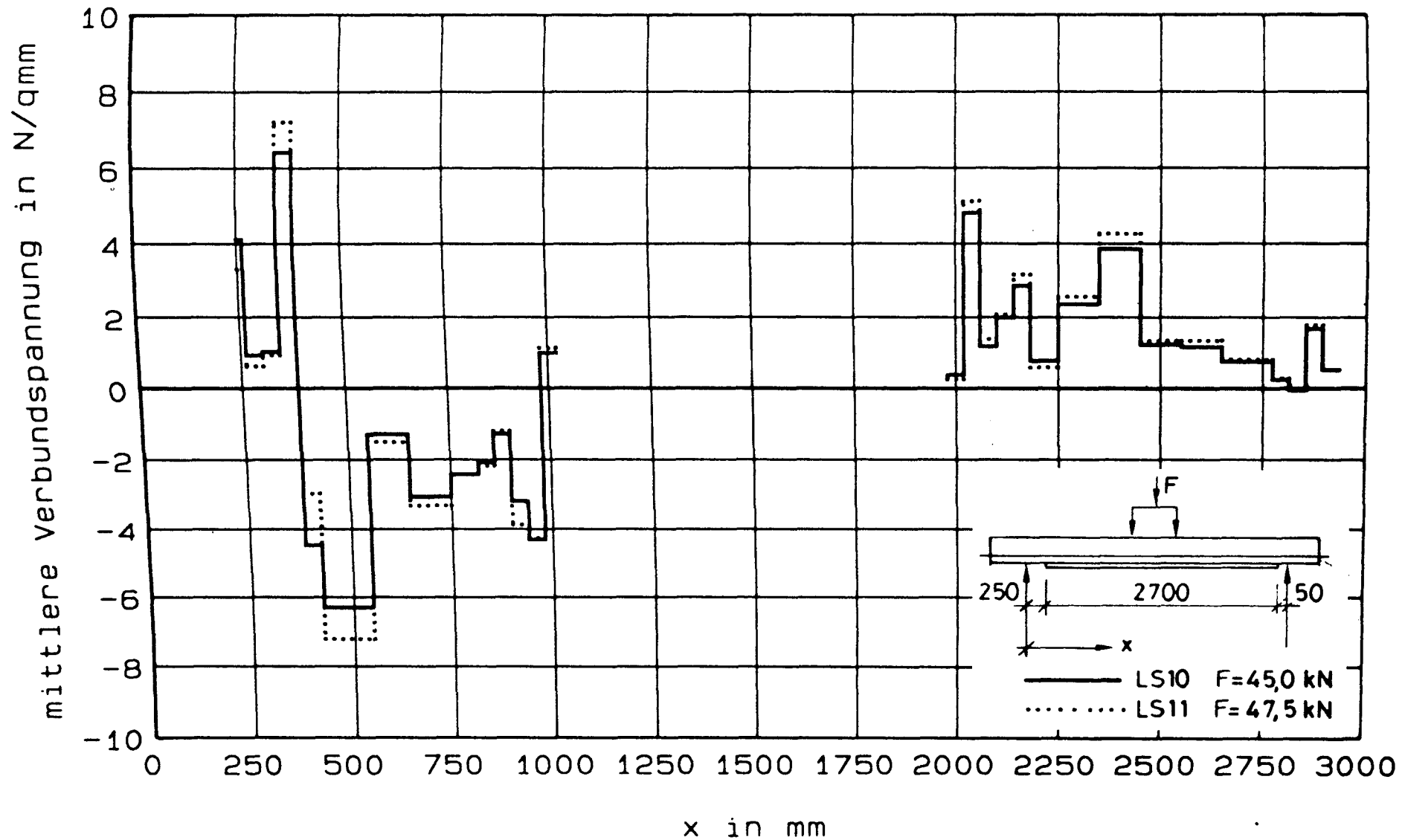


Bild 8.128 : mittlere Verbundspannung - Balken SB03, LF1

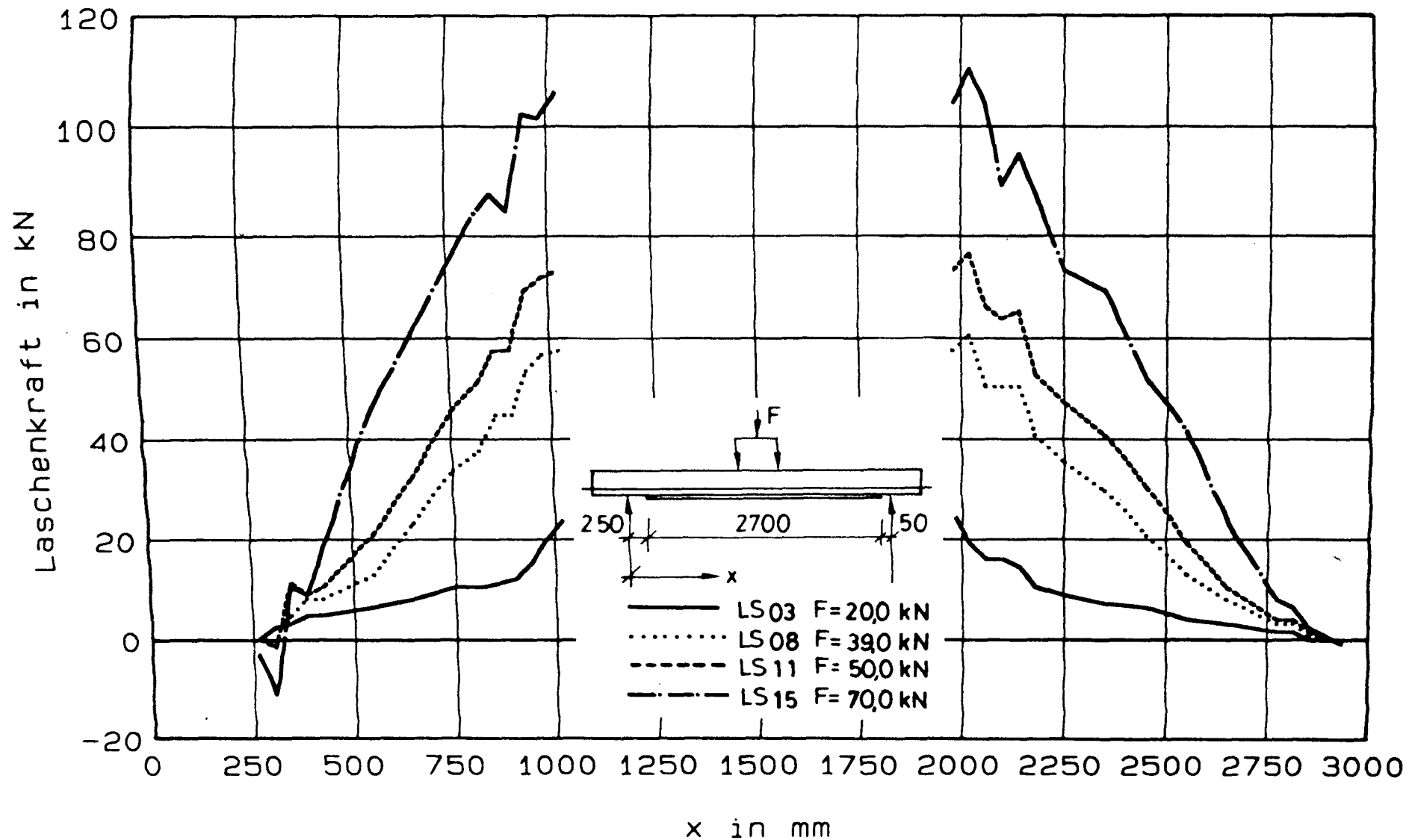


Bild 8.129 : Laschenkraft - Balken SB04, LF1

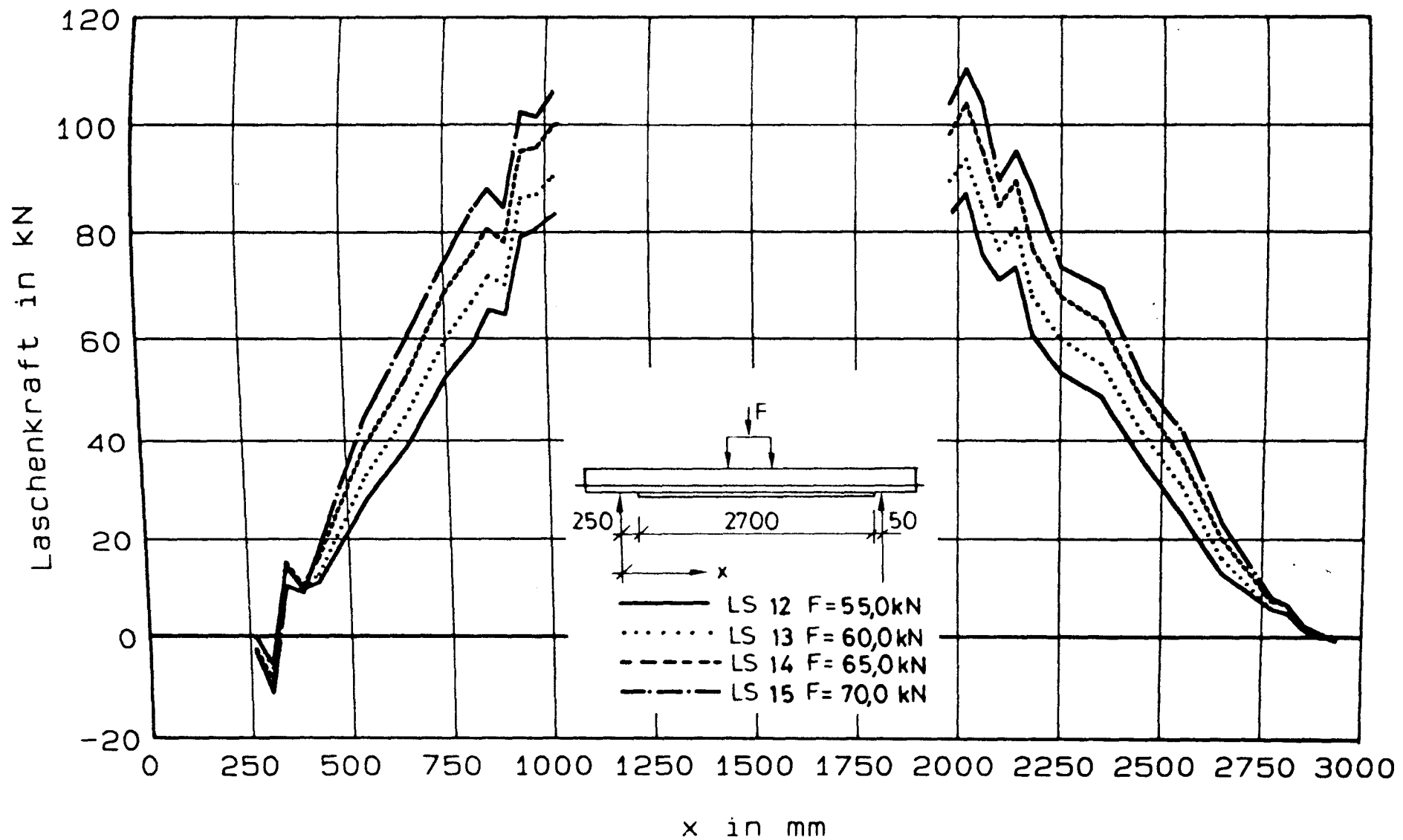


Bild 8.130 : Laschenkraft - Balken SB04, LF1

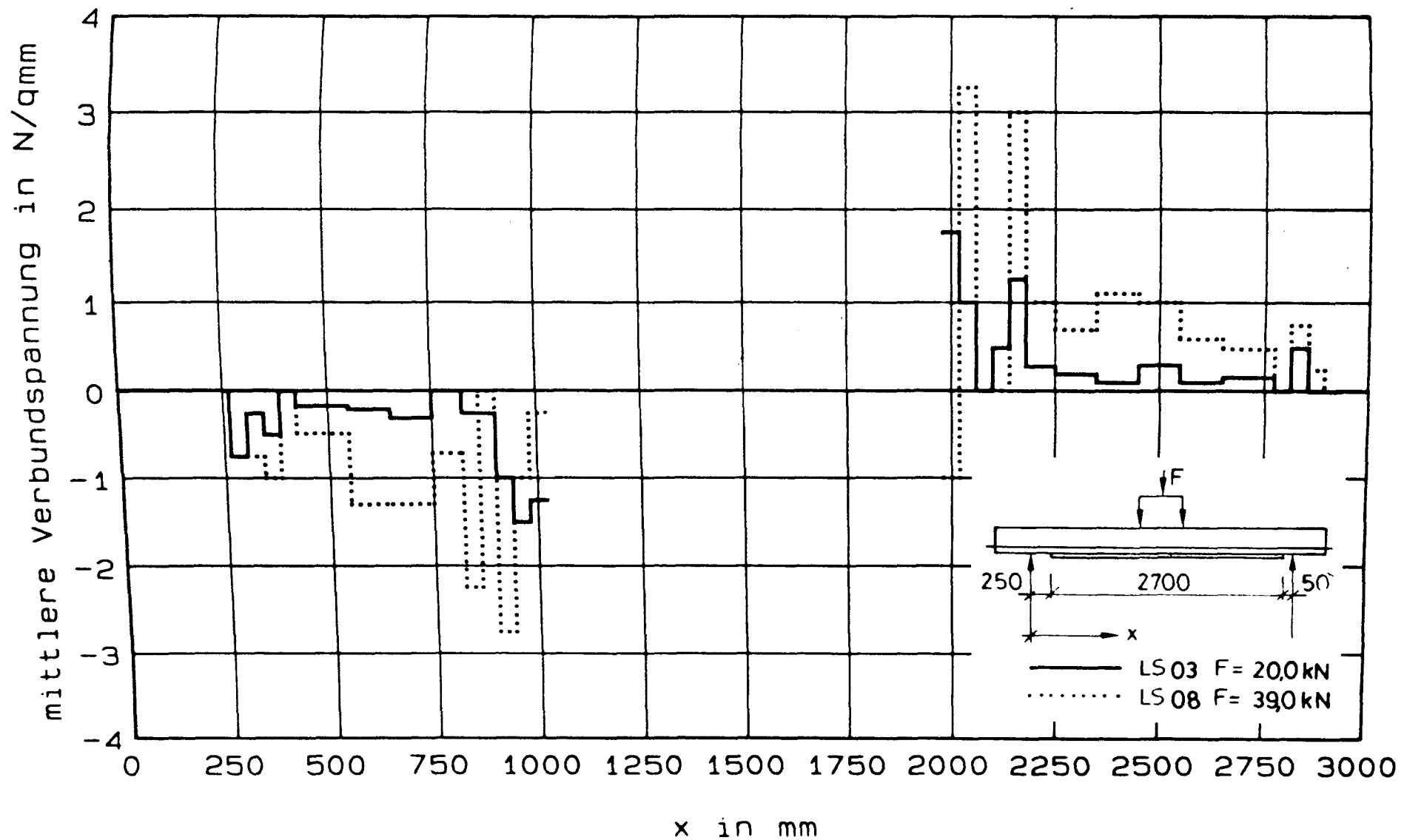


Bild 8.131 : mittlere Verbundspannung - Balken SB04, LF1

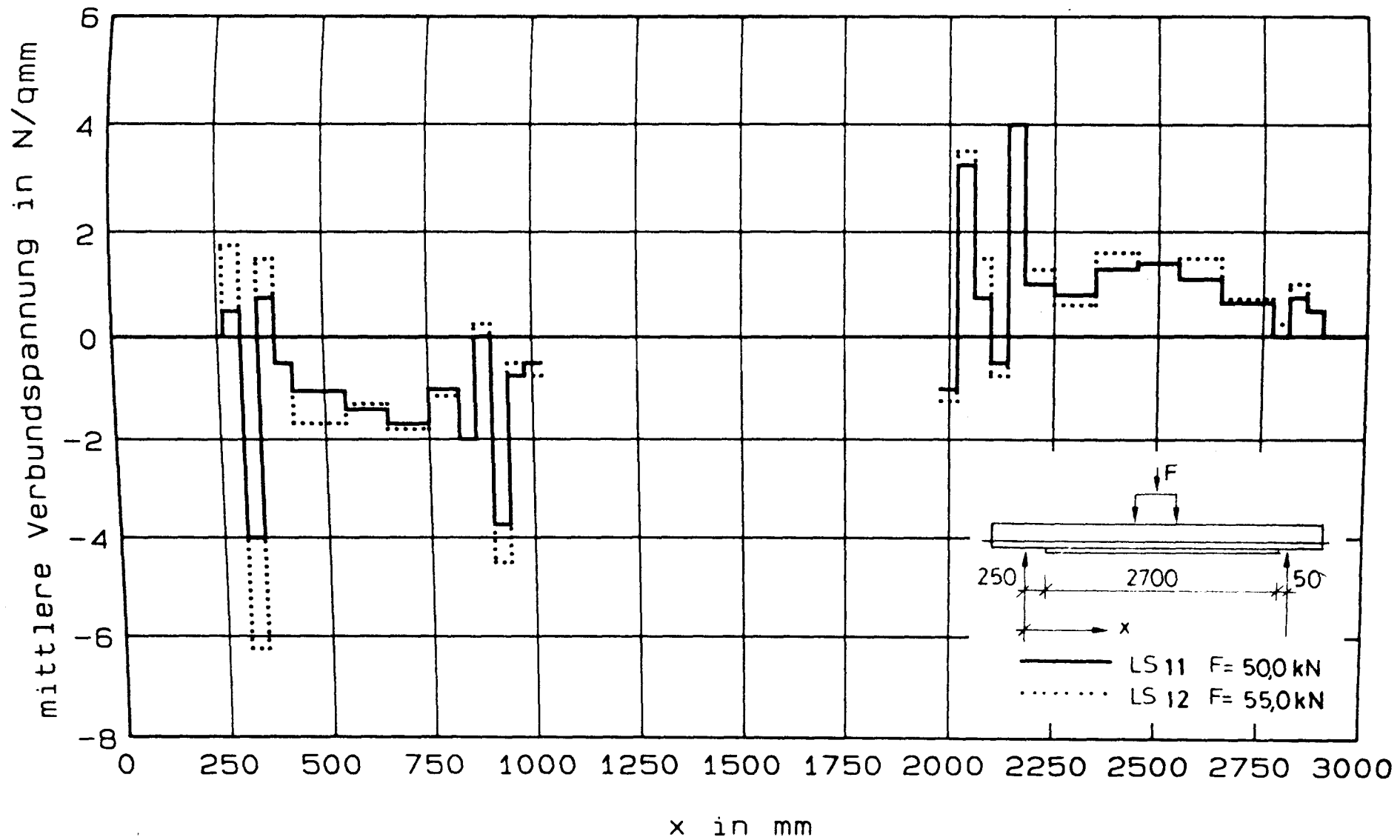


Bild 8.132 : mittlere Verbundspannung - Balken SB04, LF1

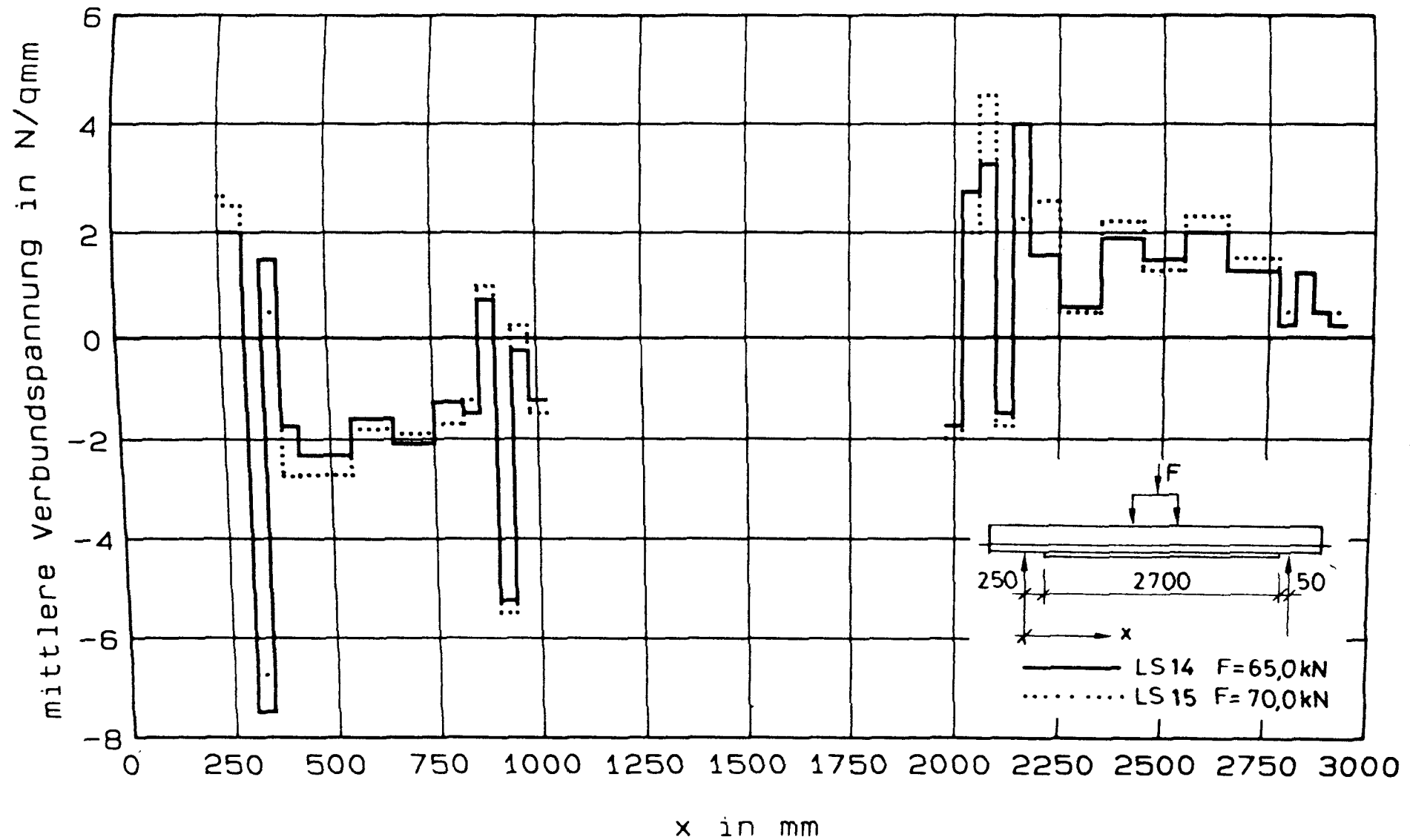


Bild 8.133 : mittlere Verbundspannung - Balken SB04, LF1

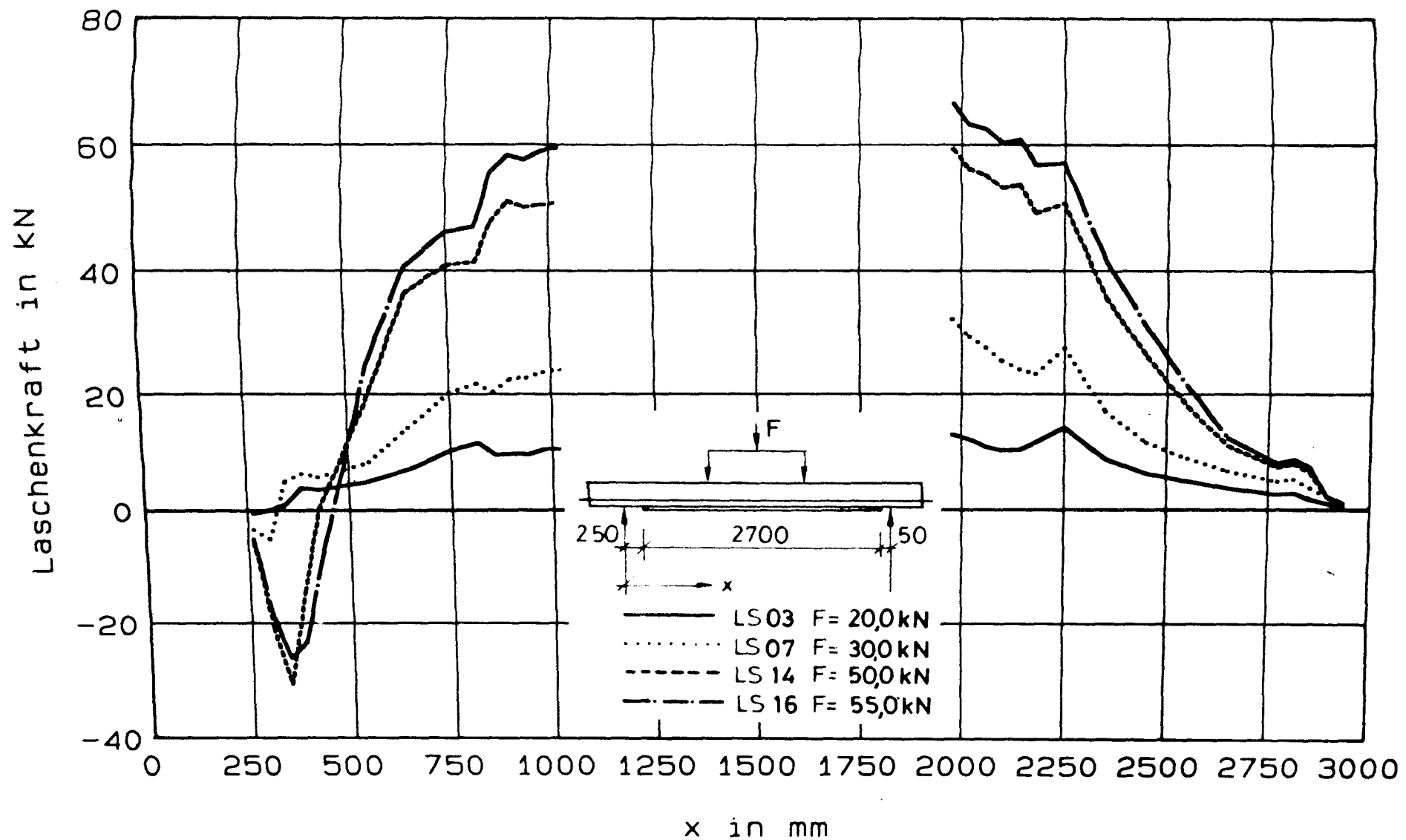


Bild 8.134 : Laschenkraft - Balken SB05, LF1

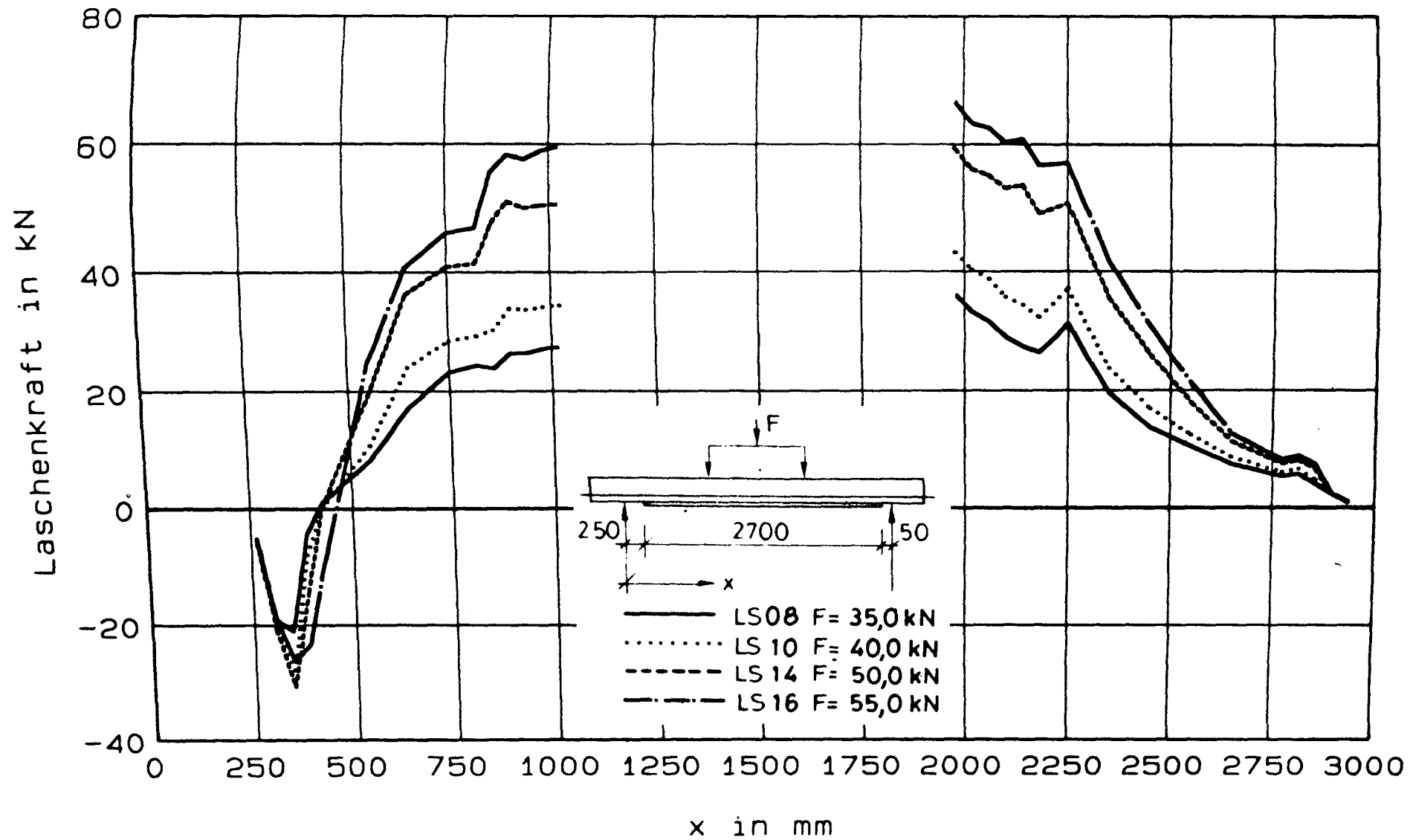


Bild 8.135 : Laschenkraft - Balken SB05, LF1

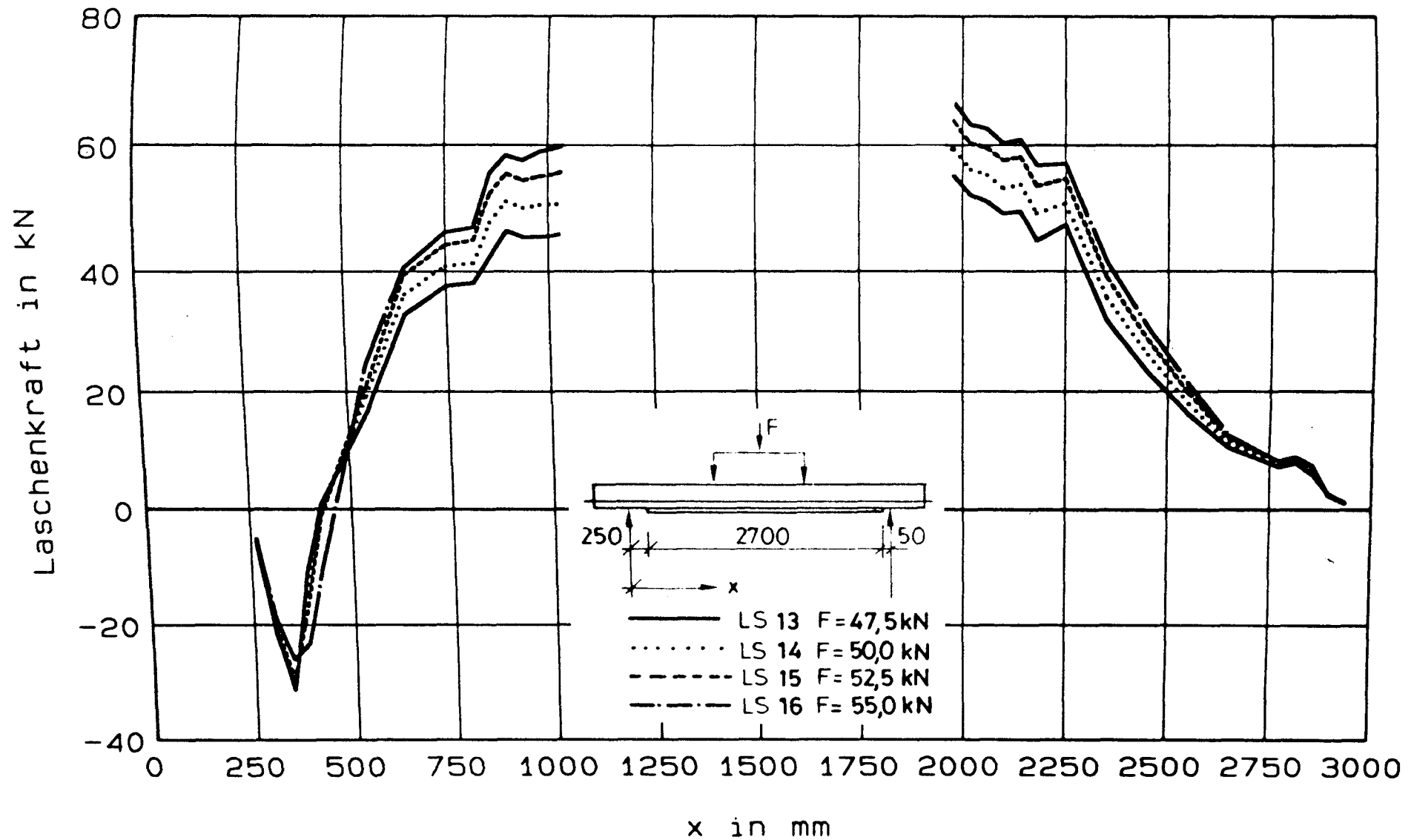


Bild 8.136 : Laschenkraft - Balken SB05. LF1

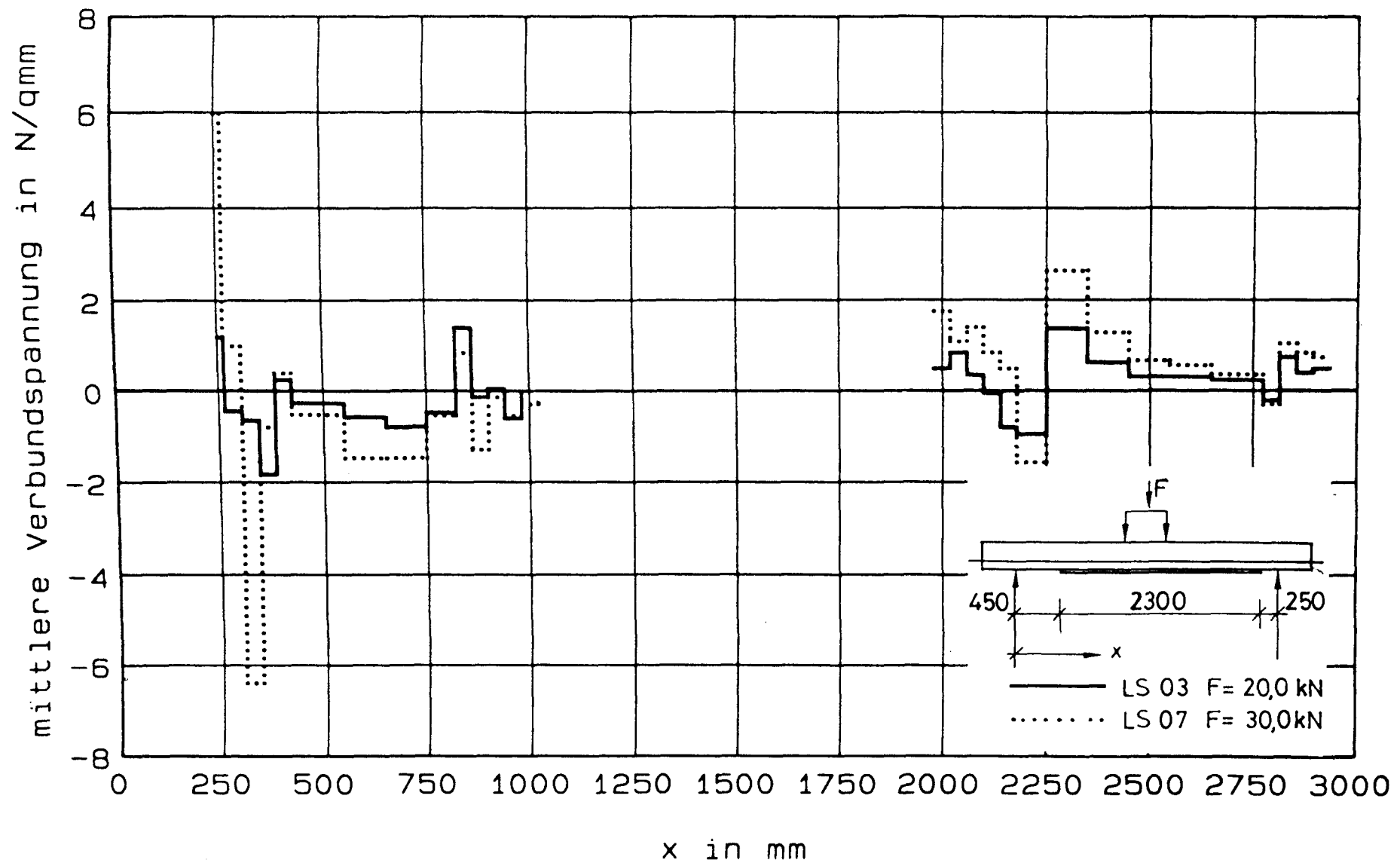


Bild 8.137 : mittlere Verbundspannung - Balken SB05, LF1

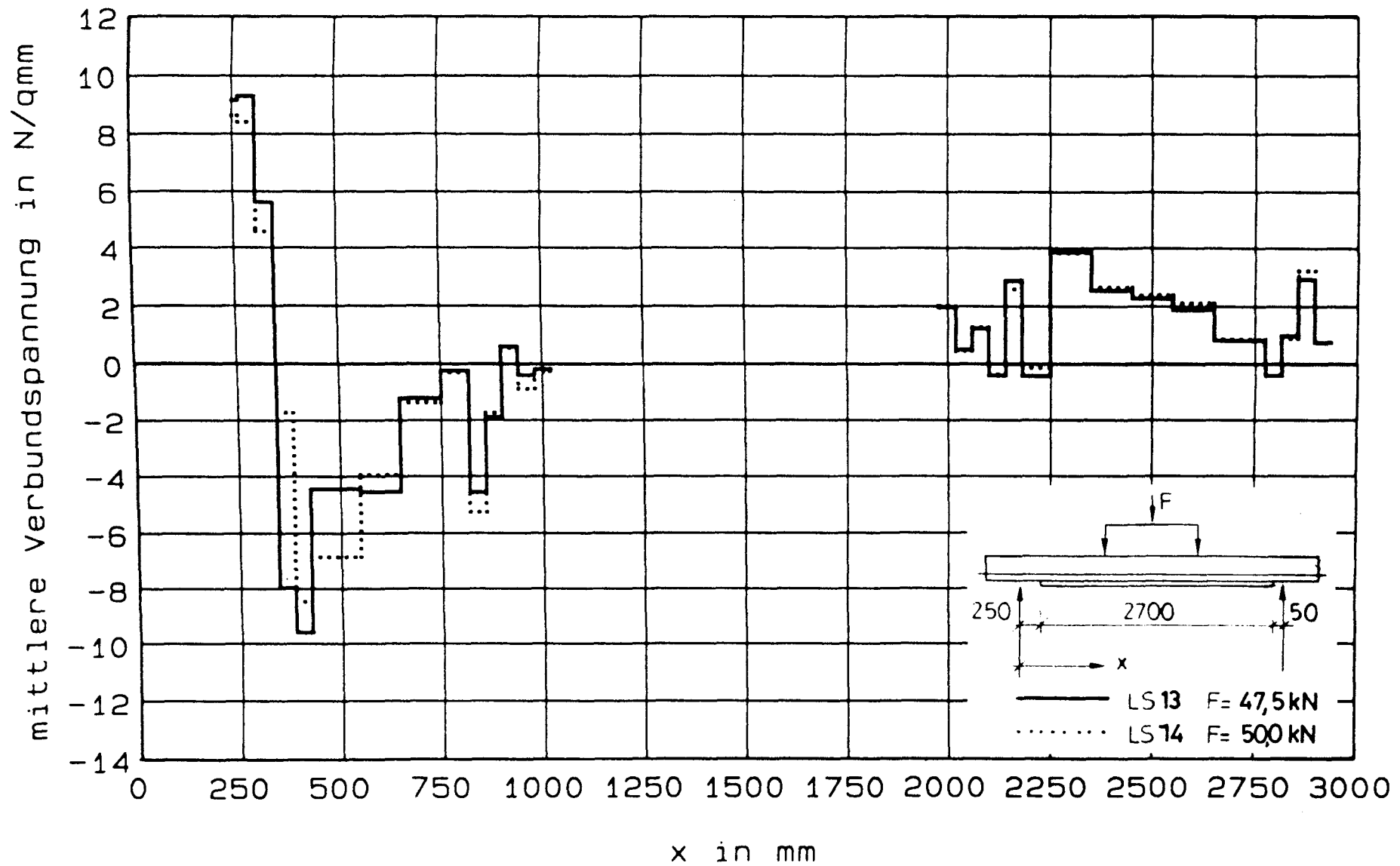


Bild 8.138 : mittlere Verbundspannung - Balken SB05, LF1

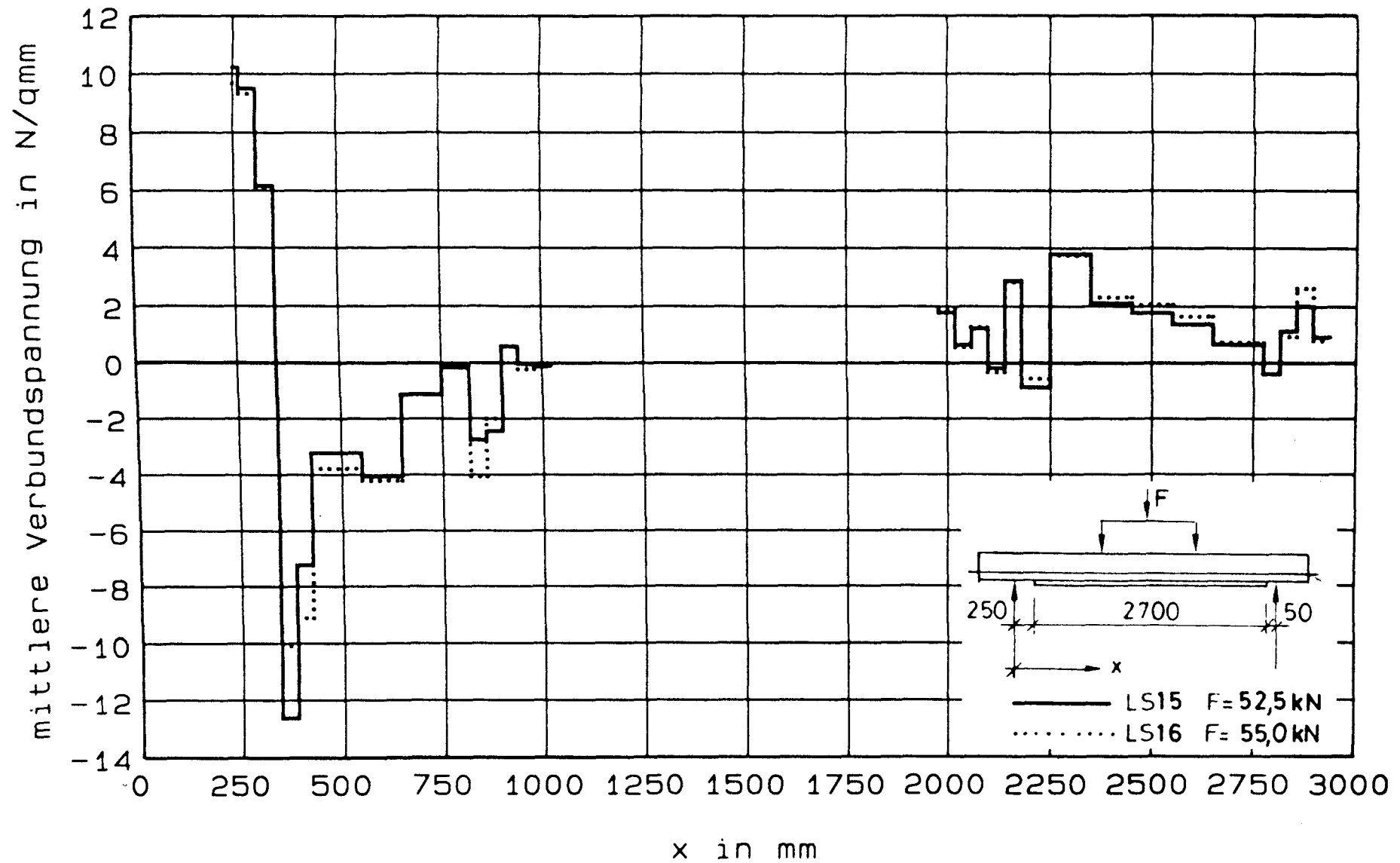


Bild 8.139 : mittlere Verbundspannung - Balken SB05, LF1

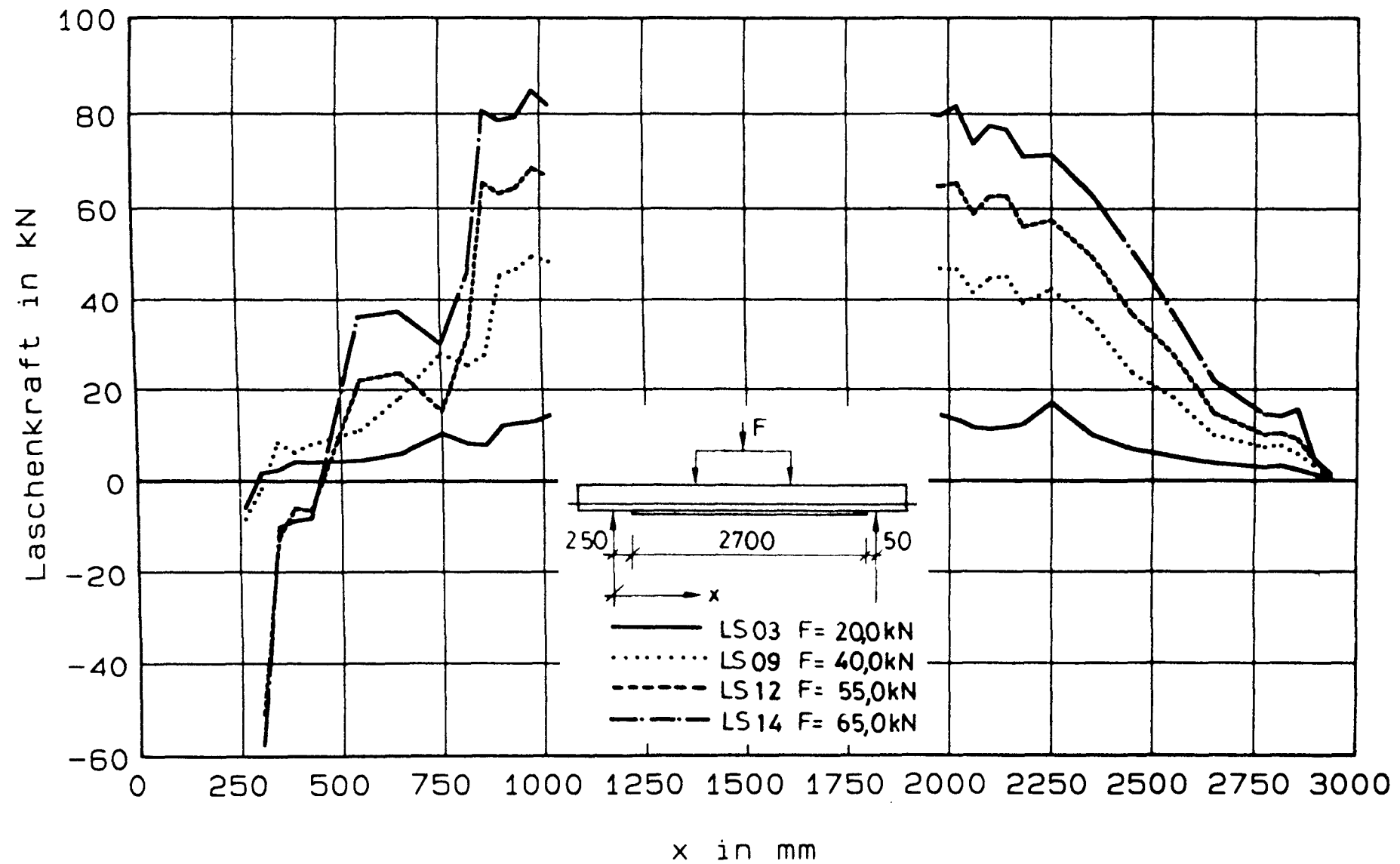


Bild 8.140 : Laschenkraft - Balken SB06, LF1

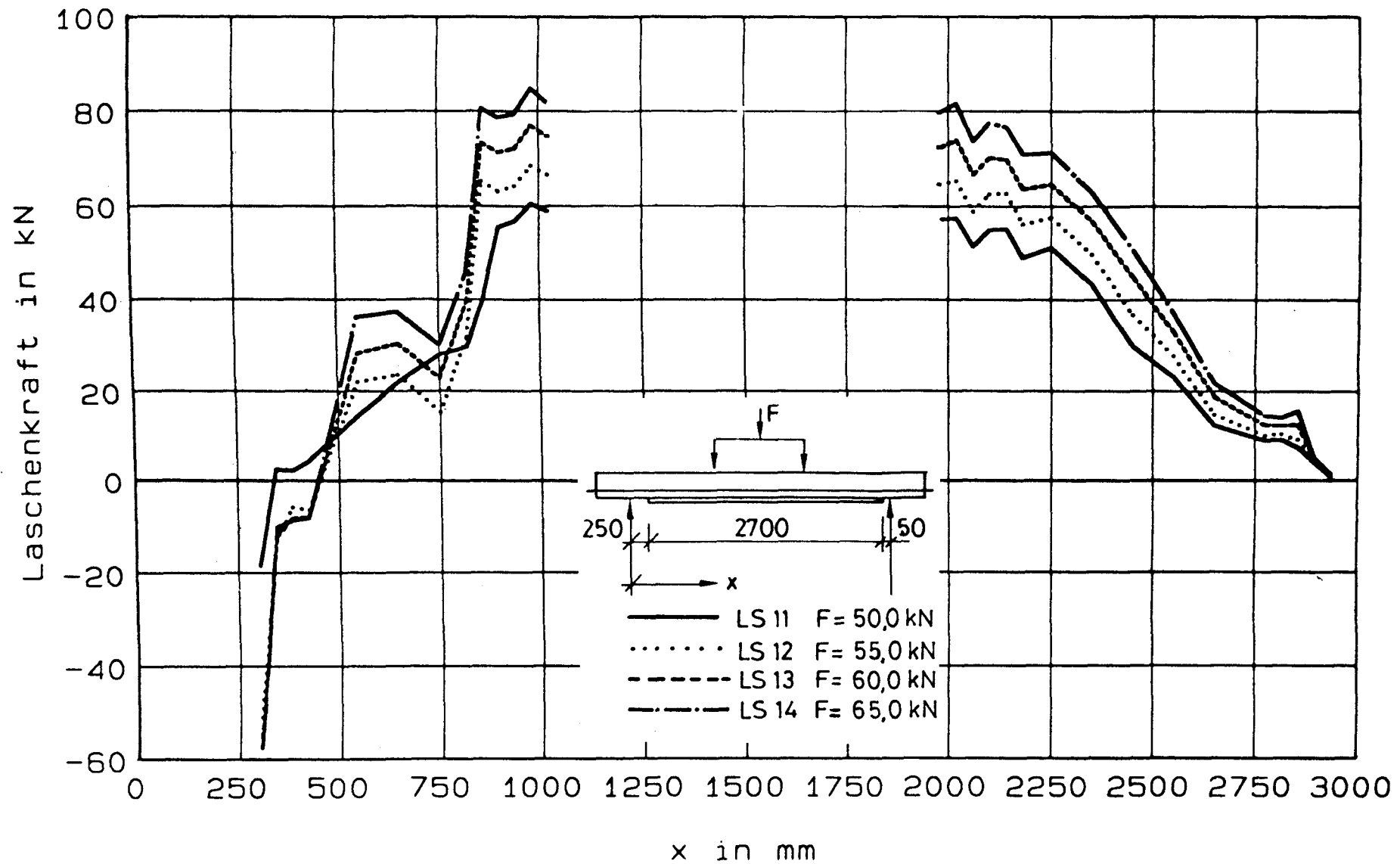


Bild 8.141 : Laschenkraft - Balken SB06, LF1

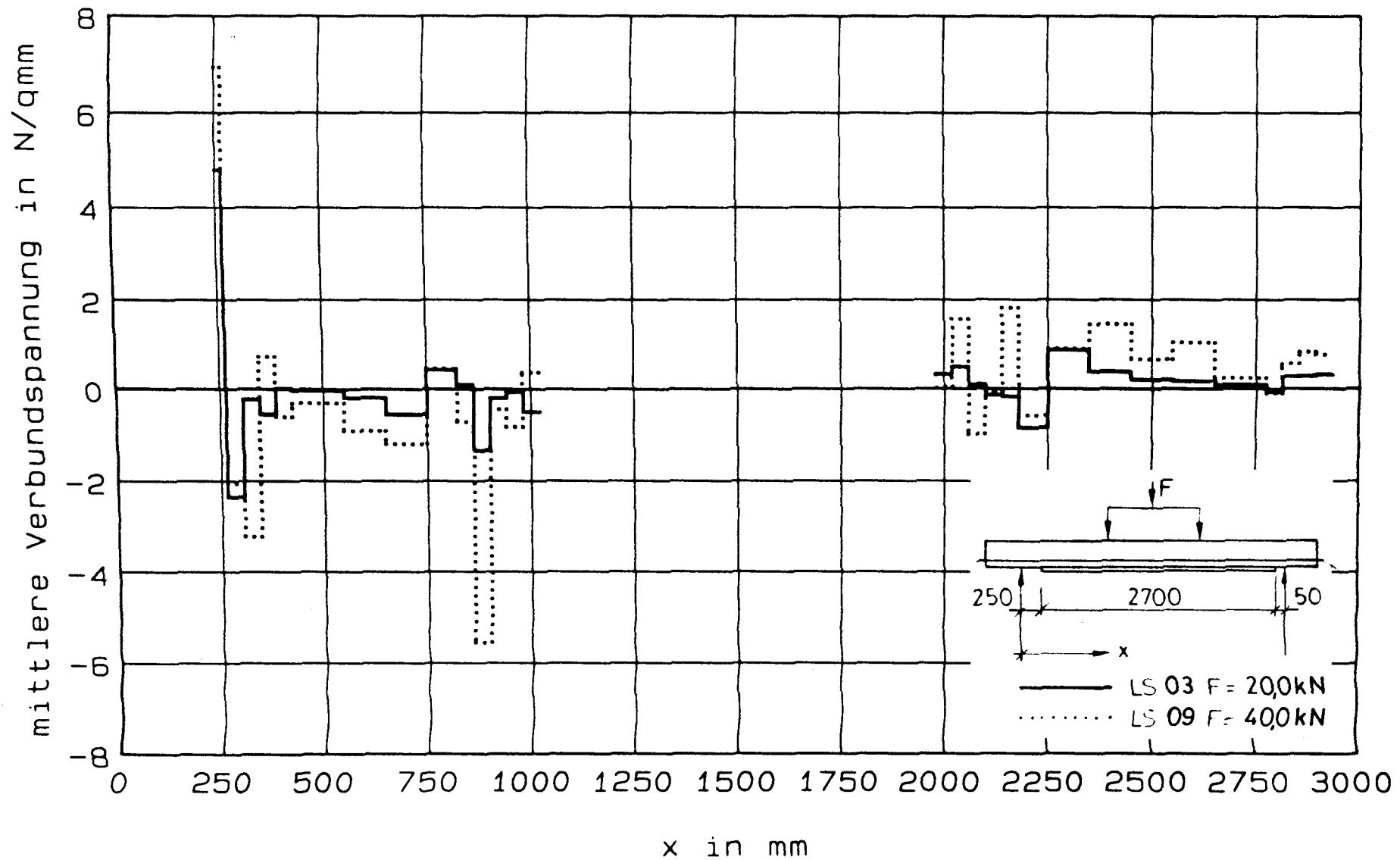


Bild 8.142 : mittlere Verbundspannung - Balken SB06, LF1

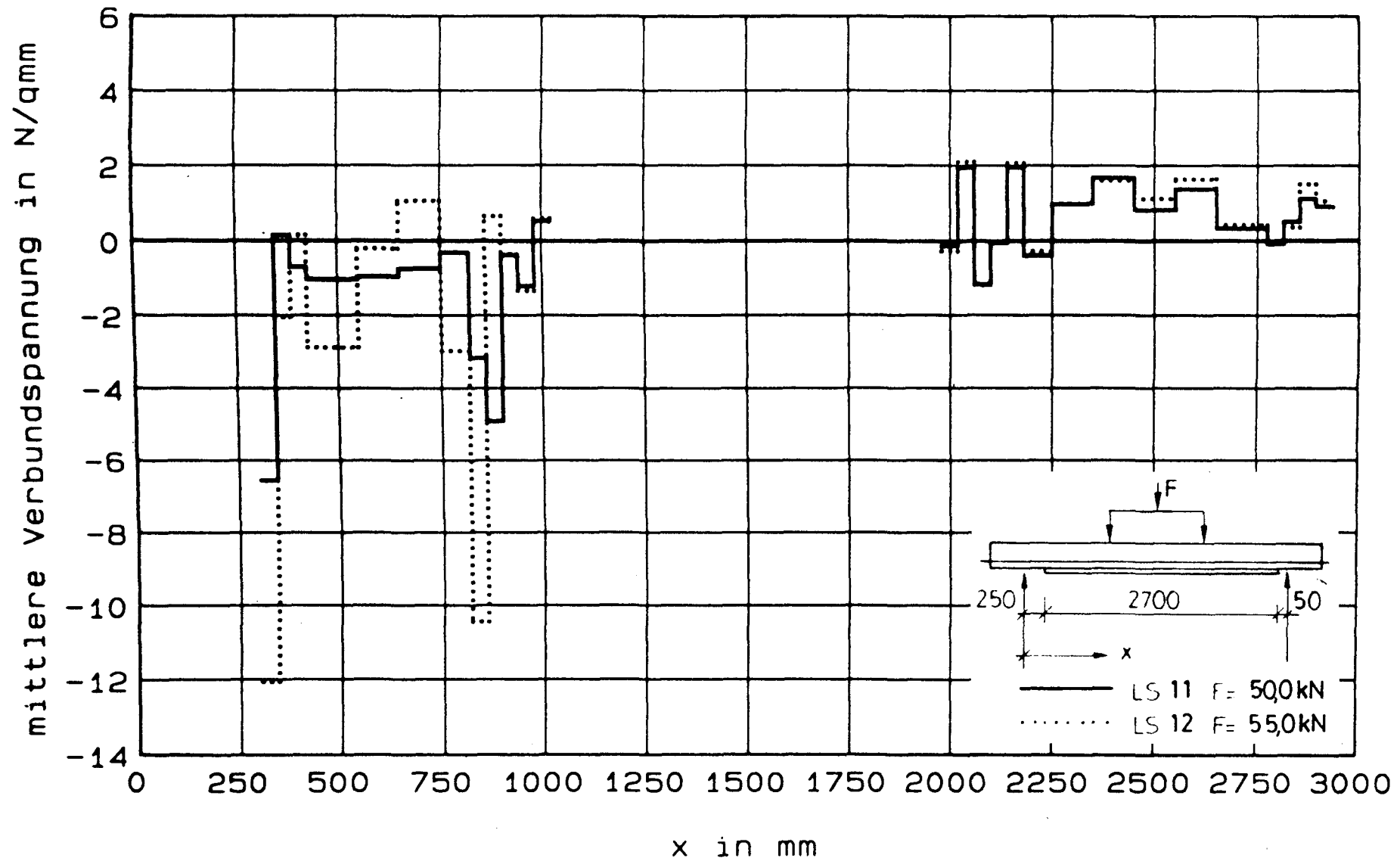


Bild 8.143 : mittlere Verbundspannung - Balken SB06, LF1

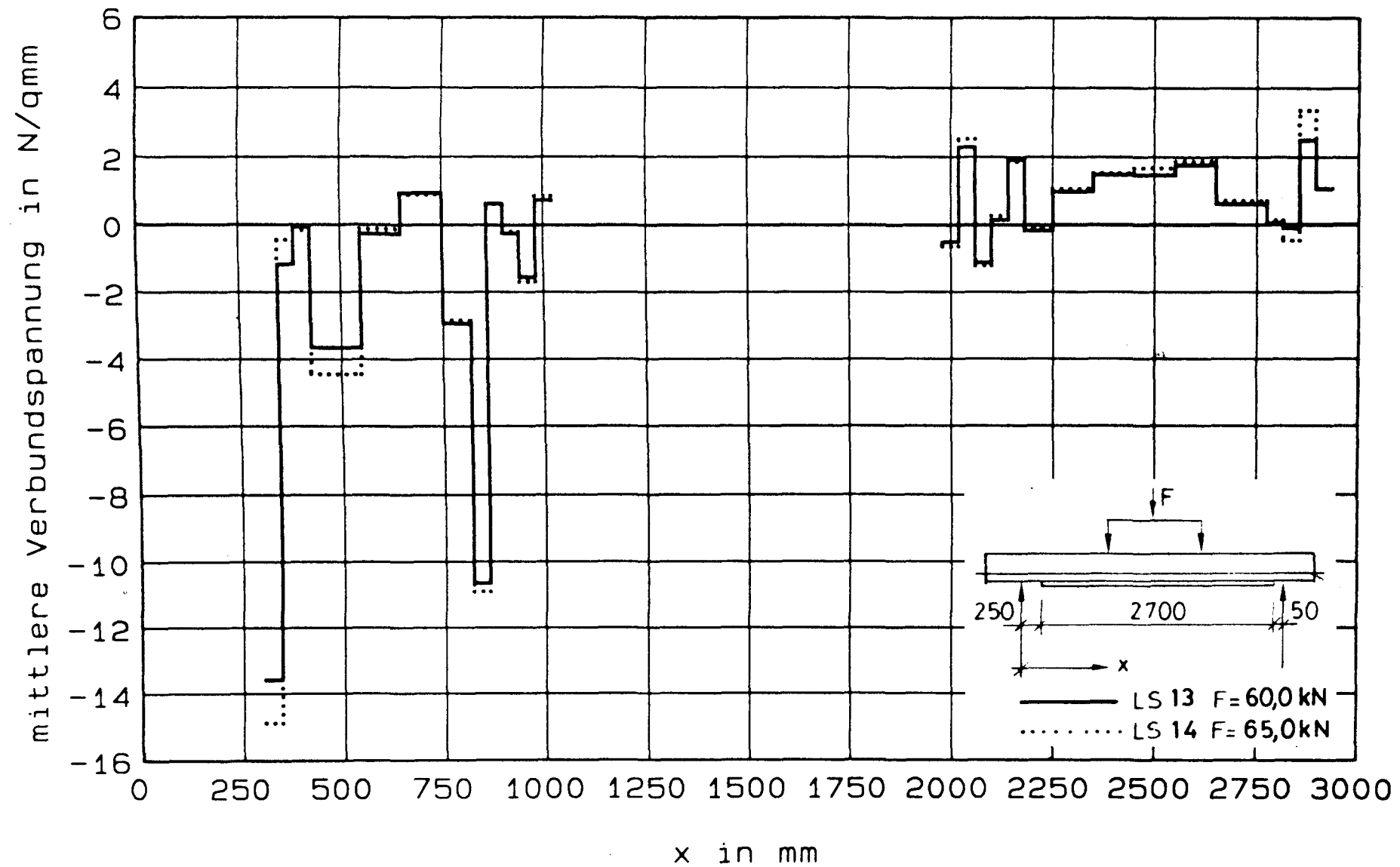


Bild 8.144 : mittlere Verbundspannung - Balken SB06, LF1